Zbornik Radova

52. Internacionalni Simpozijum o Operacionim Istraživanjima

www.symopis2025.fon.bg.ac.rs

SYM-OP-IS 2025

Palić, 7– 10 September 2025.

ZBORNIK RADOVA

(DRAFT VERZIJA)

DRAFT VERZIJA

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

IZVRŠNI ORGANIZATOR

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

GLAVNI ORGANIZATOR

DOPIS

Društvo operacionih istraživača Srbije

ORGANIZATORI

Saobraćajni fakultet, Beograd

Matematički fakultet, Beograd

Matematički institut SANU, Beograd

Ekonomski fakultet, Beograd

Ministarstvo odbrane Republike Srbije

Vojska Republike Srbije

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Univerzitet u Banjoj Luci

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Visoka građevinsko-geodetska škola, Beograd

Institut Mihailo Pupin, Beograd

Ekonomski institut

SYM-OP-IS PODRŽAVAJU

Република Србија
Министарство просвете,
науке и технолошког развоја

АКАДЕМИЈА
ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
СРБИЈЕ

DRAFT VERZIJA

PROGRAMSKI ODBOR

Kuzmanović Marija, predsednik PO, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Makajić-Nikolić Dragana, zamenik predsednika PO, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Aleksić Vule, Univerzitet u Beogradu, Visoka građevinsko-geodetska škola, Srbija

Banković Radoje, Univerzitet u Beogradu, Vojnogeografski institut, Srbija

Bjelić Nenad, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija

Ćirović Goran, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija

Davidović Tatjana, Univerzitet u Beogradu, Matematički institut SANU, Srbija

Delibašić Boris, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Dimitrijević Branka, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija

Dražić Milan, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Srbija

Dugošija Đorđe, Državni univerzitet u Novom Pazaru, Srbija

Đorović Boban, Univerzitet odbrane, Srbija

Janković Irena, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija

Kočović Jelena, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija

Kratica Jozef, Univerzitet u Beogradu, Matematički institut SANU, Srbija

Kutlača Đuro, Univerzitet u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Srbija

Martić Milan, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Miljanović Igor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Srbija

Mladenović Zorica, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija

Mučenski Vladimir, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija

Netjasov Feđa, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija

Nikolić Dragan, Univerzitet u Beogradu, Visoka građevinsko-geodetska škola, Srbija

Nikolić Miloš, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija

Pamučar Dragan, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Papuga Saša, Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet, Bosna i Hercegovina

Peško Igor, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija

Petrović Dalibor, Ministarstvo odbrane, Srbija

Petrović Nataša, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Praštalo Željko, Univerzitet u Beogradu, Rudarski institut, Srbija

Preradović Ljubiša, Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Bosna i Hercegovina

Radojević Dragan, Univerzitet u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Srbija

Savić Aleksandar, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Srbija

Savić Gordana, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Simić Dejan, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Stamenković Mladen, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija

Stanić Stanko, Univerzitet u Banjoj Luci, Ekonomski fakultet, Bosna i Hercegovina

Stanimirović Zorica, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet, Srbija

Stanojević Milan, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

Stojković Dejan, Ministarstvo odbrane, Srbija

Suknović Milija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija

DRAFT VERZIJA

Šelmić Milica, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija
Urošević Dragan, Univerzitet u Beogradu, Matematički institut SANU, Srbija
Vujošević Mirko, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Aloise Daniel, Univerzitet Natal, Brazil
Artiba Abdelhakim, Univerzitet u Valensiji, Francuska
Carrizosa Emilio, Univerzitet u Sevilji, Španija
Duarte Abraham, Univerzitet kralja Huana Karlosa, Španija
Eremeev Anton, Omski državni univerzitet, Rusija
Escudero Laureano, Univerzitet Migel Ernandes, Španija
Hanafi Saïd, Univerzitet u Valensijenu, Francuska
Hudec Miroslav, Ekonomski univerzitet u Bratislavi, Slovačka
Kochetov Yuri, Institut za matematiku Sobolev, Novosibirsk, Rusija
Labbé Martine, Slobodni univerzitet u Briselu, Belgija
Melián Batista Belén, Univerzitet La Laguna, Španija
Migdalas Athanasios, Aristotelov univerzitet u Solunu, Grčka
Moreno-Perez José A., Univerzitet La Laguna, Španija
Papageorgiou Markos, Tehnički univerzitet Krit, Grčka
Raidl Guinter, Tehnički univerzitet u Beču, Austrija
Salhi Said, Univerzitet u Kentu, Ujedinjeno Kraljevstvo
Sevaux Marc, Univerzitet Južne Bretanje, Francuska
Sifaleras Angelo, Univerzitet Makedonija, Grčka
Sörensen Kenneth, Univerzitet u Antverpenu, Belgija
Velkovski Trajče, Univerzitet Sveti Ćirilo i Metodije, Skoplje, Severna Makedonija

DRAFT VERZIJA

POČASNI PROGRAMSKI ODBOR

Andrejić Marko, Univerzitet odbrane, Vojna akademija, Srbija
Backović Marko, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija
Batanović Vladan, Univerzitet u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Srbija
Borović Siniša, Univerzitet u Beogradu, Fakultet medicinskih nauka i sporta, Srbija
Vujić Slobodan, Univerzitet u Beogradu, Rudarski institut, Srbija
Vuleta Jovo, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija
Đorđević Branislav, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija
Guberinić Slobodan, Univerzitet u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Srbija
Ilić Aleksandar, Univerzitet odbrane, Ministarstvo odbrane, Srbija
Kovač Mitar, Univerzitet odbrane, Ministarstvo odbrane, Srbija
Kovačević-Vujčić Vera, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Mesaroš Katalin, Univerzitet u Novom Sadu, Ekonomski fakultet, Srbija
Mihaljević Miodrag, Univerzitet u Beogradu, Matematički institut SANU, Srbija
Milovanović Gradimir, Srpska akademija nauka i umetnosti (SANU), Srbija
Mučibabić Spasoje, Univerzitet odbrane, Ministarstvo odbrane, Srbija
Ognjanović Zoran, Univerzitet u Beogradu, Matematički institut SANU, Srbija
Opricović Serafim, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija
Pap Endre, Univerzitet Singidunum, Srbija
Petrović Slavica, Univerzitet u Kragujevcu, Ekonomski fakultet, Srbija
Rakić Milan, Univerzitet u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Srbija
Stanojević Milorad, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija
Starčević Dušan, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Cvetković Dragoš, Srpska akademija nauka i umetnosti (SANU), Srbija
Čabarkapa Obrad, Univerzitet odbrane, Ministarstvo odbrane, Srbija
Čangalović Mirjana, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Zečević Tomislav, Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Srbija

ORGANIZACIONI ODBOR

Bisera Andrić Gušavac, predsednik OO, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Biljana Panić, zamenik predsednika OO, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Ognjen Nikolić, tehnički sekretar, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Andrijana Džamić, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Isidora Gaćeša, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Pavle Milošević, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Srbija
Nenad Medić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija
Ivana Jovanović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Srbija

DRAFT VERZIJA

SADRŽAJ

SYM-OP-IS 2025
52nd Symposium on Operational Research
Palić, 7 - 10.9.2025.

ANALITIKA PERFORMANSI 1

EVALUACIJA EFIKASNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE U EU I SRBIJI PRIMENOM WINDOW DEA ANALIZE
Isidora Gaćeša, Gordana Savić, Milena Popović 2

PRONALAŽENJE LOKACIJE STUDENTSKOG STANA UZ POMOĆ DEA METODE
Ilija Ivezić, Bisera Andrić Gušavac 8

ANALIZA PERFORMANSI BAZA PODATAKA ZA OBRADU GPS PODATAKA
Petar Lakčević, Siniša Vlajić 14

EKOLOŠKI MENADŽMENT I UPRAVLJANJE PRIRODNIM RESURSIMA 19

KA ZELENOJ TRANZICIJI: LJUDSKI RESURSI KAO NOSIOCI EKOLOŠKIH PROMENA U ORGANIZACIJI
Danilo Veličkov, Nataša Petrović, Jelena Andreja Radaković, Katarina Veličkov 20

EKONOMSKI MODELI I EKONOMETRIJA 26

UPOREDNA ANALIZA POSLOVNIH CIKLUSA PRIMENOM HP I HAMILTONOVOG FILTERA
Jovana Mileusnić, Zorica Mladenović 27

FINANSIJE I BANKARSTVO 33

ZELENI FINANSIJSKI INSTRUMENTI
Irena Janković 34

ФИНАНСИРАЊЕ ВОЈНЕ АКАДЕМИЈЕ У ФУНКЦИЈИ РАЗВОЈА ЊЕНИХ КАПАЦИТЕТА
Milena Knezević, Dragana Stoiljković-Nikolić, Anja Jeina 40

OD KLASIČNE DO SAVREMENE PRIMENE METODE ULANČANIH LESTVICA ZA PROCENU REZERVACIJA ZA ŠTETE
Jelena Kočović, Marija Koprivica, Kristina Bradić 46

ФИНАНСИЈСКА ИЗДВАЈАЊА ЗА НАБАВКУ ДРОНОВА У СВЕТУ И НА БАЛКАНУ
Sanja Marković 52

ANALIZA FINANSIJSKIH IZDVAJANJA ZA ODBRANU OD STRANE ''SVETSKIH SILA'' U PERIODU OD 2020. DO 2024. GODINE
Tanja Mladenović, Tamara Dimić, Vinko Žnidaršič *58*

FINANSIRANJE SEKTORA ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE TOKOM PANDEMIJE COVID – 19
Sergej Zarić 63

GEOINFORMACIONI SISTEMI 69

UPOTREBA GIS U PROCENI ŠTETNIH UTICAJA DIVLJIH DEPONIJA NA REKE U SRBIJI
Nebojsa Janjić 70

INFORMACIONI SISTEMI I TEHNOLOGIJE 76

WINDOWS I LINUX OPERATIVNI SISTEMI: POUZDANOST ZAŠTITE KORISNIČKIH PODATAKA, KONTROLA AŽURIRANJA I RIZICI OD MALICIOZNOSTI U LOKALNOJ RAČUNARSKOJ MREŽI
Sanja Klajić, Branko Vujatović, Darko Grubač, Nenad Stojanović *77*

ANALIZA RIZIKA U IMPLEMENTACIJI ERP SISTEMA
Željko Spasenić, Nemanja Milanović, Miloš Milosavljević *83*

LOGISTIKA I LANCI SNABDEVANJA 89

RASPOREĐIVANJE BRODOVA NA PRISTAJALIŠTA PRIMENOM PROŽDRLJIVIH HEURISTIČKIH ALGORITAMA
Milica Babić, Miloš Nikolić, Ivana Vukićević Biševac *90*

ПРИМЕНА ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА И ПРИСТУПА КЛИЗАЈУЋЕГ ХОРИЗОНТА ПЛАНИРАЊА ЗА РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ЗАЈЕДНИЧКОГ ПОРУЧИВАЊА У ВИШЕКАНАЛНОЈ ПРОДАЈИ
Milica Radević, Dražen Popović, Gordana Radivojević *96*

MATEMATIČKO PROGRAMIRANJE 102

ODREĐIVANJE BROJA I LOKACIJA VERTIPORTA PRIMENOM MODELA CELOBROJNOG LINEARNOG PROGRAMIRANJA – PRIMER GRADA BEOGRADA,
Feđa Netjasov, Draženko Glavić *103*

MEKO RAČUNARSTVO 109

ФАЗИ ПРИСТУП У ПРОЦЕСУ СЕЛЕКЦИЈЕ СТАРТАП ИДЕЈА
Zoran Rakićević, Aleksandar Rakićević, Ognjen Anđelić 110

NAUKA O PODACIMA 116

LLM + DEX: BRŽA I OBJAŠNJIVA KONSTRUKCIJA HIJERARHIJSKIH MODELA ODLUČIVANJA
Sandro Radovanović, Boris Delibašić, Marko Bohanec, Milija Suknović 117

POSLOVNA ANALITIKA 123

KVANTITATIVNI MODEL ZA OPTIMIZACIJU PORTFOLIJA PROJEKATA KONTINUALNOG UNAPREĐENJA
Milena Gatić, Bisera Andrić Gušavac, Barbara Simeunović, Dragana Stojanović 124

POUZDANOST I UPRAVLJANJE RIZIKOM 130

ANALIZA SAJBER RIZIKA PORTALA EUPRAVA KORIŠĆENJEM OCTAVE ALLEGRO PRISTUPA
Andrijana Džamić, Isidora Gaćeša, Dragana Makajić-Nikolić 131

PRIMENE OI U ODBRANI 137

DEFINISANJE PARAMETARA ZA OPTIMIZACIJU RADARSKE MREŽE PRI OTKRIVANJE ROJA DALJINSKI PILOTIRANIH VAZDUHOPLOVA
Đorđe Đukić 138

UTICAJ PERCEPCIJE MOGUĆNOSTI ALTERNATIVNOG ZAPOŠLJAVANJA NA NAMERU FLUKTUACIJE PROFESIONALNIH VOJNIKA
Dejan Nikolić, Dejan Stojković, Jelena Petrović 143

DEFINISANJE VREDNOSTI ROYALTY-A ZA POVERLJIVE PRONALASKE U OBLASTI ODBRANE
Dalibor Petrović, Jelena Vicanović 149

RUDARSTVO, GEOLOGIJA I ENERGETIKA 155

PRORAČUN EKSPLOATACIONIH REZERVI UGLJA I PRATEĆIH SEDIMENATA PRI PROJEKTOVANJU PODVODNE EKSPLOATACIJE NA RUDNIKU KOVIN

Branka Jovanović, Svetlana Polavder, Sanja Grujičić 156

SAOBRAĆAJ, TRANSPORT I KOMUNIKACIJE 160

PRIMENA METODE FUNKCIONALNE ANALIZE REZONANCE NA SUDAR VAZDUHOPLOVA IZNAD ZAGREBA

Nađa Drmanić, Feđa Netjasov 161

KOMPARACIJA KANO MODELA I KLASTER ANALIZE ZA OCENU ATRIBUTA KVALITETA ŽELEZNIČKIH USLUGA

Bojan Mirković, Dragana Macura, Milica Šelmić 167

KOLIKO KOŠTA ZANEMARIVANJE DEGRADACIJE BATERIJE: INTEGRISANI MODEL ZA ELEKTRIFIKACIJU AUTOBUSKIH LINIJA

Marko Stokić, Branka Dimitrijević, Vladimir Momčilović 173

SIMULACIJA I STOHASTIČKI MODELI 179

SIMULACIONA ANALIZA UTICAJA UPRAVLJAČKIH FAKTORA NA PERFORMANSE VIŠEFAZNOG PROIZVODNOG SISTEMA POD POLCA KONTROLOM

Nemanja Tulimirović, Ivan Tomašević, Marija Ćirić, Dragoslav Slović 180

STATISTIČKI MODELI 186

ФЕНОМЕН ПРВЕ ЦИФРЕ И ИЗБОРНА ФОРЕНЗИКА: ПАРЛАМЕНТАРНИ ИЗБОРИ У СРБИЈИ 2012–2023.

Rajko Bukvić 187

КОНКУРЕНЦИЈА И ДОМИНИРАЊЕ НА ТРЖИШТУ ОСИГУРАЊА У СРБИЈИ: МАТРИЦА SV ЗА ПЕРИОД 2018–2024. ГОДИНЕ

Rajko Bukvić, 193

HIBRIDNI PRISTUP PREDIKCIJE NBA DRAFTA: MAŠINSKO UČENJE U KOMBINACIJI SA IVANOVIĆEVIM ODSTOJANJEM

Petar Graovac, Milan Radojičić, Aleksandar Đoković 199

VEŠTAČKA INTELIGENCIJA 205

PRIMENA VELIKIH JEZIČKIH MODELA U NAUČNOM ISTRAŽIVANJU
Miloš Živadinović, Dejan Simić *206*

VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA I OPTIMIZACIJA 212

ХИБРИДНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ ЈЕЛОВНИКА У ВОЈНОЈ АКАДЕМИЈИ ПРИМЕНОМ „ГРУБИХ БРОЈЕВА”
Slaviša Arsić, Dragan Pamučar, Miljojko Janošević *213*

PRIMENA AHP METODE ZA PROCENU VEROVATNOĆE USPEHA MLADIH KANDIDATA NA VOZAČKOM ISPITU
Srđan Ljubojević, Jelena Vicanović, Ana Zekić *219*

PROCENA USPEŠNOSTI KANDIDATA NA POLAGANJU VOZAČKOG ISPITA POMOĆU TOPSIS METODE I NJENIH MODIFIKACIJA
Jasmina Vujadinović, Ivana Sarić, Rale Nikolić *225*

ANALITIKA PERFORMANSI

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

EVALUACIJA EFIKASNOSTI CIRKULARNE EKONOMIJE U EU I SRBIJI PRIMENOM WINDOW DEA ANALIZE

EVALUATION OF CIRCULAR ECONOMY EFFICIENCY IN THE EU AND SERBIA USING WINDOW DEA ANALYSIS

ISIDORA GAĆEŠA[1], GORDANA SAVIĆ[2], MILENA POPOVIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, isidora.gacesa@fon.bg.ac.rs, 0009-0002-0907-7170
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, gordana.savic@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-6233-1815
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, milena.popovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-2947-8054

Rezime: *Ovaj rad analizira efikasnost zemalja Evropske unije i Srbije u primeni principa cirkularne ekonomije u periodu od 2010. do 2023. godine, korišćenjem dinamičkog DEA modela sa pokretnim vremenskim prozorima (Window DEA BCC). Evaluacija je izvršena na osnovu tri ulazna indikatora (potrošnje sirovina, zavisnosti od uvoza i emisije gasova sa efektom staklene bašte) i jednog izlaznog indikatora (produktivnosti resursa). Rezultati ukazuju na postojanje značajnih razlika u efikasnosti među analiziranim zemljama, kao i na vremensku dinamiku performansi. Srbija se ističe kao jedna od stabilnijih i efikasnijih zemalja, dok pojedine članice EU beleže značajne oscilacije ili pad u ostvarenim rezultatima (Luksemburg i Estonija).*

Ključne reči: *Cirkularna ekonomija, Window DEA, efikasnost, Evropska unija, Srbija.*

Abstract: *This paper analyzes efficiency of the European Union countries and Serbia in the domain of implementation of the circular economy practices from 2010 to 2023, by employing the Window DEA BCC analysis. The evaluation was conducted based on three input indicators (material footprint, material import dependency, and greenhouse gas emissions) and one output indicator (resource productivity). The obtained results suggest that there are significant differences between the analyzed countries. Serbia has stood out as one of the most stable and efficient countries, while some countries, such as Luxembourg and Estonia, have significant fluctuations or a drop in the results.*

Keywords: *Circular economy, efficiency, Window DEA, European Union, Serbia.*

1. UVOD

Tradicionalni ekonomski sistemi u velikoj meri zasnivaju se na linearnom modelu poznatom kao pristup „otvorenog ciklusa“ („open-loop“) (Bongers & Casas, 2022). Ovaj model podrazumeva ekstrakciju prirodnih resursa koji se koriste u industrijskoj proizvodnji, a zatim, nakon što izgube upotrebnu vrednost, završavaju kao otpad. Takav pristup često se smatra izrazito neodrživim zbog velikog opterećenja koje nameće prirodnim ekosistemima, kao i zbog značajne količine otpada koja nastaje usled intenzivne potrošnje i procesiranja (Neves & Marques, 2022).

Kao odgovor na neefikasnost ovog modela i ograničenja prirodnog okruženja, razvijen je novi koncept koji polako preuzima dominantnu ulogu u svetskim ekonomijama — cirkularna ekonomija (CE) (Rizos et al., 2017). CE je često poznata i kao model „zatvorenog ciklusa“ („closed-loop“), jer ključni fokus stavlja na minimizaciju upotrebe neobrađenih resursa i smanjenje količine otpada. Za razliku od tradicionalnog pristupa, CE teži da produži životni vek sirovina i materijala održavajući njihovu upotrebnu vrednost kroz ponovnu upotrebu i recikliranje. Jedan od osnovnih ciljeva cirkularne ekonomije jeste postizanje veće resursne produktivnosti uz što je moguće manje štetnog uticaja na životnu sredinu (Tavera Roremo et al., 2021; Velenturf & Purnell, 2021). Njeni osnovni principi obuhvataju očuvanje resursa, unapređenje efikasnosti kroz reciklažu i ponovnu upotrebu, kao i redizajn procesa s ciljem smanjenja uticaja na životnu sredinu (de Oliveira & Oliveira, 2023).

DRAFT VERZIJA

Rast globalne populacije, praćen značajnim povećanjem nivoa potrošnje, doveo je do planetarnog proboja CE, čineći ovaj relativno mladi koncept vitalnom strategijom u oblasti održivog razvoja i zaštite životne sredine. Brojni svetski akteri, među kojima su Kina, Japan i Evropska unija, već godinama integrišu CE u svoje ekonomske i ekološke politike i planove. Dok Kina posmatra CE kao sveobuhvatnu strategiju koja obuhvata kontrolu zagađenja i zaštitu životne sredine, evropske zemlje fokusiraju se na upravljanje otpadom i očuvanje prirodnih resursa (Bleischwitz et al., 2022; Bongers & Casas, 2022). Zanimljivo je da je najveća posvećenost i angažman u oblasti CE prisutan upravo u zemljama Evropske unije (Meseguer-Sánchez et al., 2021).

S obzirom na sve veći značaj CE, naročito među zemljama članicama EU, ključno je izvršiti evaluaciju ne samo načina na koji ove zemlje inkorporiraju cirkularnu ekonomiju u svoje politike, već i koliko su efikasne u upravljanju resursima i smanjenju otpada. Cilj ovog rada je da oceni performanse zemalja članica EU u implementaciji praksi CE, sa posebnim naglaskom na materijalni uticaj i produktivnost resursa. Da bi se to postiglo, u ovom radu primenjena je Analiza obavijanja podataka nad panel podacima (Window DEA metoda), koja omogućava dinamičku procenu i poređenje zemalja tokom vremena. Cilj je da se pruže značajni uvidi u efikasnost i održivost napora u oblasti cirkularne ekonomije širom EU, kao i da se identifikuju ključni faktori koji utiču na smanjenje uticaja na životnu sredinu i unapređenje ekonomskih rezultata.

2. OD STATIČNE KA DINAMIČKOJ ANALIZI: DEA U CIRKULARNOJ EKONOMIJI

U prethodnoj deceniji zabeležen je porast broja istraživanja koja primenjuju Analizu obavijanja podataka (DEA) kako bi evaluirala performanse članica Evropske unije pri implementaciji CE praksi. Većina studija implementira tradicionalne DEA modele poput BCC i CCR, često koristeći indikatore povezane sa generisanjem i upravljanjem otpadom, poput količine komunalnog ili ukupnog otpada na strani ulaza i stope reciklaže na strani izlaza (Horvat et al., 2023; Banjerdpaiboon & Limleamthong, 2023; Marques & Teixeira, 2022). Neka od analiziranih istraživanja proširila su navedeni pristup tako što su uključila indikatore povezane sa ekonomijom i inovacijama u poslovanju, poput bruto domaćeg proizvoda, energetske produktivnosti i tehnoloških ulaganja u domenu upravljanja otpadom (Nazarko et al., 2022; Marjanović et al., 2025). I dok se brojna istraživanja fokusiraju na statičku procenu efikasnosti, razmatrajući podatke za pojedinačne vremenske periode, svega nekoliko autora (Giannakitsidou et al., 2020; Milanović et al., 2022) primenilo je DEA pristup za kreiranje kompozitnog indeksa cirkularne ekonomije u svrhu šireg poređenja.

Dok se ranija istraživanja uglavnom fokusiraju na statičku procenu, u novijoj literaturi sve je prisutnija i dinamička procena performansi država tokom vremena primenom Window DEA metode. Ratner i koautori (2025) kombinuju Window DEA analizu sa modelima regiona sigurnosti kako bi evaluirali efikasnost članica EU u periodu od 2014. do 2021. godine na osnovu indikatora kao što su privatne investicije, broj zaposlenih u sektoru CE, kao i dodatna vrednost izlaza. Iako je došlo do pomaka ka dinamičkom pristupu evaluaciji performansi, većina razmatranih studija oslanja se pretežno na starije podatke, čije najsvežije observacije datiraju uglavnom iz 2021. godine, što je verovatno posledica nedostupnosti podataka za poslednjih nekoliko godina. U skladu sa tim, postoji prostor za dalje istraživanje vremenske dimenzije implementacije cirkularne ekonomije i identifikaciju faktora koji utiču na dosledne performanse, naročito primenom dinamičkih DEA modela kao što je Window DEA.

3. METODOLOGIJA

Analiza obavijanja podataka (DEA) predstavlja neparametarsku tehniku linearnog programiranja koju su razvili Charnes, Cooper i Rhodes (1978), a koristi se za procenu efikasnosti srodnih entiteta, poznatih kao jedinice odlučivanja (Decision Making Units – DMU), koje koriste više raznorodnih ulaza za proizvodnju više raznorodnih izlaza. Ključna prednost DEA metode u odnosu na neke druge statističke pristupe za ocenu efikasnosti, poput stohastičke analize granice (SFA), jeste u tome što ne zahteva prethodno poznavanje oblika proizvodne funkcije i ne oslanja se na pretpostavke o distribuciji podataka, što je čini posebno pogodnom za primenu u složenim kontekstima kao što je cirkularna ekonomija (Zhu, 2020; Ji & Lee, 2010).

Osnovni DEA model, predstavljen 1978. godine, jeste CCR model, koji pretpostavlja konstantni prinos na obim, tj. da povećanje vrednosti ulaza rezultuje proporcionalnim povećanjem vrednosti izlaza. Manje od decenije kasnije razvijen je i BCC model, koji pretpostavlja varijabilni prinos na obim, a predstavili su ga Banker, Charnes i Cooper 1984. godine. Navedeni modeli konstruišu granicu efikasnosti, koja predstavlja deo po deo linearnu aproksimaciju određenju performansama najuspešnijih jedinica u posmatranom skupu, u odnosu na koju se vrši procena relativne efikasnosti svih ostalih jedinica. Efikasnost se izražava indeksom koji se dobija rešavanjem zasebnog problema linearnog programiranja za svaku jedinicu u posmatranom

skupu, pri čemu se određuju optimalne vrednosti težinskih koeficijenata za ulaze i izlaze (Farantos, 2015; Panwar et al., 2022). DEA modeli mogu biti ulazno ili izlazno orijentisani, u zavisnosti od toga da li je cilj minimizacija potrebnih ulaza ili maksimizacija proizvedenih izlaza (Gerami et al., 2022). Matematička formulacija CCR i BCC DEA modela u linearnoj formi prikazana je u Tabeli 1. U navedenoj notaciji svaka DMU (j = 1, 2, …, n) koristi m ulaza za proizvodnju s izlaza.

Tabela 1: CCR i BCC DEA modeli

CCR i BCC model	Notacija
$(max)h_k = \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rk} + \boldsymbol{u^*}, k = 1, \dots, n$ (1) $p.o.$ $\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ik} = 1$ (2) $\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} + \boldsymbol{u^*} \leq 0, j = 1, \dots, n$ (3) $v_i \geq 0, i = 1, \dots, m$ (4) $u_r \geq 0, r = 1, \dots, s$ (5)	• x_{ij} – količina i-tog ulaza j-te DMU ($x_{ij} > 0$); • y_{rj} – količina r-tog izlaza j-te DMU ($y_{rj} > 0$); • h_k – relativna efikasnost (indeks) k-te DMU; • v_i – težinski koeficijent i-tog ulaza; • u_r – težinsk koeficijent r-tog izlaza. Ključnu razliku u matematičkoj formulaciji između CCR i BCC modela predstavlja korektivni faktor $\boldsymbol{u^*}$ u BCC modelu, čija se vrednost koristi za prilagođavanje ocene efikasnosti u zavisnosti od prinosa na obim. Konkretno: • Za $u^* < 0$, prinos na obim je nerastući. • Za $u^* > 0$, prinos na obim je neopadajući. • Za $u^* = 0$, BCC model postaje ekvivalentan CCR modelu, odnosno prinos na obim je konstantan.

Za razliku od tradicionalne DEA metode, koja omogućava statičku procenu efikasnosti jedinica odlučivanja na osnovu podataka iz pojedinačnih vremenskih perioda, Window DEA analiza omogućava dinamičku evaluaciju performansi kroz vreme. Ovaj pristup posmatra svaku DMU kao zaseban entitet u svakom vremenskom intervalu, omogućavajući praćenje promena u efikasnosti uspostavljanjem pokretnih vremenskih prozora. Window DEA se zasniva na primeni istog DEA modela, najčešće CCR ili BCC modela, tokom više međusobno preklapajućih podperioda (prozora), pružajući uvid ne samo u prosečnu efikasnost već i u trendove njenog kretanja i stabilnost rezultata kroz vreme. Dinamički pristup evaluaciji omogućava istraživačima i donosiocima odluka da procene doslednost, identifikuju fluktuacije i bolje razumeju dugoročne obrasce u ostvarenim performansama (Ratner et al., 2025).

4. SPECIFIKACIJA MODELA I INDIKATORI

Za potrebe ovog istraživanja korišćen je ulazno-orijentisani Window DEA BCC model, kako bi se procenila relativna efikasnost zemalja članica Evropske unije u pogledu korišćenja resursa i ostvarene produktivnosti u okviru cirkularne ekonomije. Model BCC je odabran zbog pretpostavke varijabilnog prinosa na obim, koja je posebno pogodan za poređenju država različitih veličina i ekonomija. Pored zemalja članica EU, u analizu je uključena i ***Republika Srbija***, sa ciljem da se sagleda njena pozicija u odnosu na evropske standarde u oblasti efikasnog korišćenja resursa. Analiza obuhvata period od 2010. do 2023. godine, pri čemu su definisani odgovarajući indikatori ulaza i izlaza u skladu sa raspoloživošću podataka iz evropske baze Eurostat. U skladu sa ciljem istraživanja, odabrana su tri indikatora ulaza i jedan indikator izlaza, koji omogućavaju evaluaciju materijalne efikasnosti posmatranih zemalja. Struktura baze podataka prikaza je u Tabeli 2.

Tabela 2: DEA ulazni i izlazni indikatori

Ulaz/Izlaz	*Naziv indikatora*	*Jedinica mere*	*Opis*	*Izvor*
Ulaz	Potrošnja sirovina (materijalni otisak)	kg po glavi stanovnika	Ukupna količina sirovina potrebna za potrošnju i investicije domaćinstava, preduzeća i vlada.	Eurostat
	Zavisnost od uvoza materijala	%	Pokazuje u kojoj meri se privreda oslanja na uvoz radi zadovoljenja svojih materijalnih potreba.	
	Emisije gasova sa efektom staklene bašte iz proizvodnih aktivnosti	kg po glavi stanovnika	Ilustruje nivo emisije GHG povezan sa domaćom proizvodnjom.	
Izlaz	Produktivnost resursa	EUR po kg	Meri koliko efikasno ekonomija koristi materijalne resurse za stvaranje dodate vrednosti.	Eurostat

Odabrani izlazni indikator, produktvnost resursa, predstavlja jedini direktan pokazatelj ostvarene dobiti sistema u okviru posmatranog modela. Iako se DEA modeli često koriste sa više izlaza, metodološki je prihvatljivo koristiti i samo jedan izlaz, ukoliko on jasno reprezentuje performanse sistema u odnosu na zadate ulaze, kao što je slučaj u prezentovanoj analizi. U konkretnom kontekstu, cilj istraživanja jeste da se oceni efikasnost upravljanja resursima, te je fokus na kvalitetnom odnosu između resursne potrošnje i ekonomskog učinka. Analiza je sprovedena korišćenjem DEA Excel Solver makroa.

RADNA VERZIJA

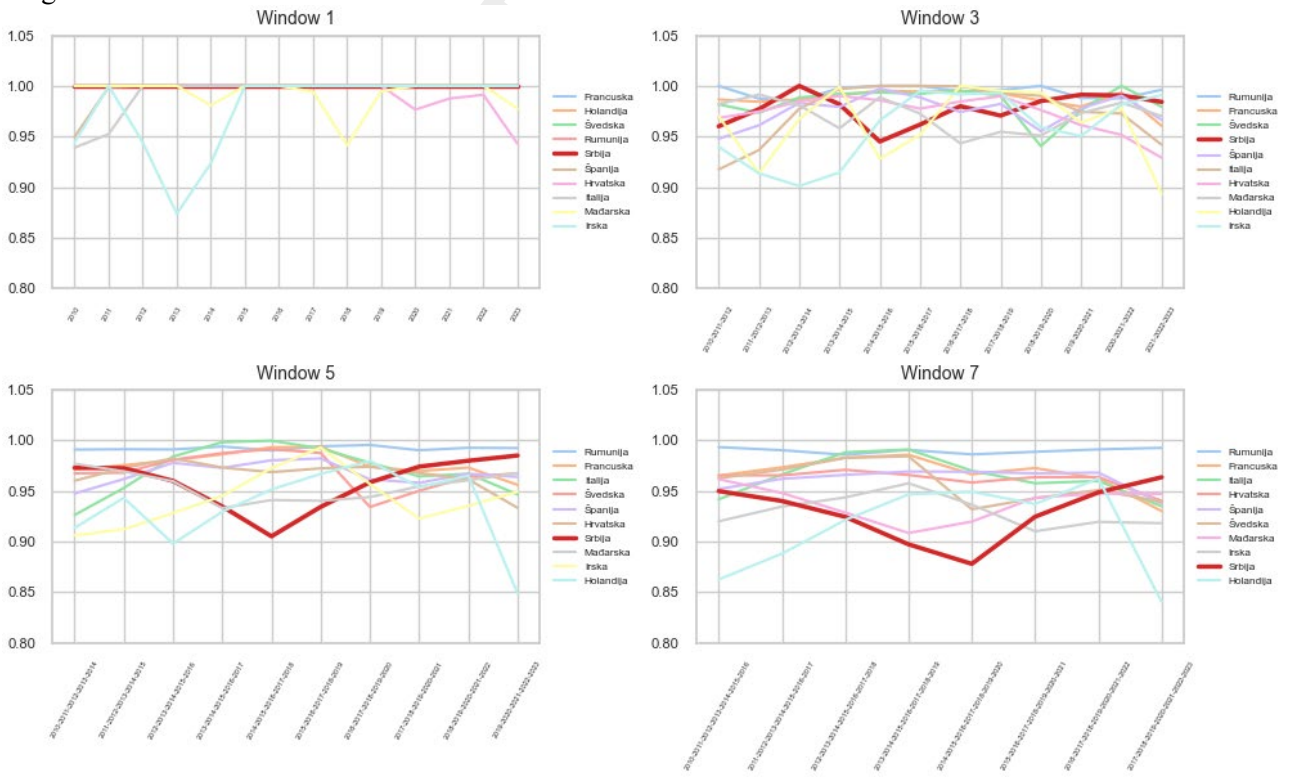
4. ANALIZA REZULTATA

U okviru sprovedenog istraživanja izvršena je detaljna evaluacija efikasnosti upravljanja resursima zemalja Evropske unije i Republike Srbije korišćenjem Window DEA BCC modela u četiri vremenska režima: sa dužinom prozora od 1, 3, 5 i 7 godina. Ovakav metodološki pristup omogućio je višedimenzionalno sagledavanje performansi, kako kroz godišnje fluktuacije, tako i kroz dugoročne obrasce ponašanja, čime su identifikovani periodi stabilnosti i tranzicije, ali i potencijalne strukturne slabosti u kontekstu cirkularne ekonomije. Pregled promene indeksa efikasnosti po prozorima dat je na Slici 1.

U analizi sa prozorom dužine 1 godine, gde se efikasnost posmatra za svaku godinu pojedinačno, zabeležene su izražene varijacije u performansama među zemljama. Srbija se u ovom modelu izdvojila kao izuzetno stabilna i visoko efikasna jedinica, sa indeksom efikasnosti koji se tokom svih godina kreće oko 0.99, čime se pozicionira izuzetno blizu DEA granice efikasnosti. Uz nju, Francuska, Holandija, Španija i Švedska beleže savršene vrednosti indeksa (1), što ukazuje na trajnu optimalnost u odnosu između ulaza i izlaza. Na suprotnoj strani nalaze se Luksemburg i Estonija - Luksemburg, koji uprkos snažnoj ekonomiji beleži indekse od svega 0.77 do 0.61 u poslednjim godinama, dok Estonija ostvaruje skromne vrednosti u rasponu od 0.58 do 0.75, što ukazuje na potencijalno neefikasnu potrošnju resursa u odnosu na generisanu dodatnu vrednost.

Prelaskom na Window analizu sa dužinom prozora od 3 godine, efikasnost se posmatra kroz trogodišnje vremenske intervale, što omogućava identifikaciju tranzicionih obrazaca. Na primer, Kipar beleži rast indeksa sa 0.64 (2010–2012) na čak 0.84 (2013–2015), nakon čega sledi blagi pad, što ukazuje na promenljivost performansi. Litvanija, koja se u prethodnoj analizi nalazila među neefikasnim zemljama, zadržava indekse između 0.67 i 0.76 kroz sve prozore, bez značajnog napretka. Luksemburg i dalje beleži pad, sa 0.95 na 0.53, potvrđujući obrazac strukturne nestabilnosti. Srbija se ponovo svrstava među najefikasnije, sa indeksom od 0.99 u četvrtom i desetom prozoru, dok se u ostalim kreće između 0.96 i 0.98, što ukazuje na visok stepen stabilnosti i sposobnost sistema da amortizuje spoljne uticaje.

Analize sa prozorima dužine 5 i 7 godina pružaju dublji uvid u dugoročnu postojanost performansi. U okviru petogodišnjih prozora, Francuska i Rumunija beleže prosečne indekse od 0.97 i više, dok Španija i Švedska održavaju efikasnost iznad 0.96. Rumunija se posebno ističe konzistentnošću - kroz svih deset prozora indeks se kreće između 0.99 i 1.00, čime se pozicionira kao najsistematičniji lider u upravljanju resursima među zemljama EU. Suprotno tome, Luksemburg beleži kontinuirani pad sa 0.93 na 0.53 u poslednjem prozoru, dok Estonija tek u završnim intervalima dostiže indeks iznad 0.68, iako je startovala sa svega 0.57.



Slika 1: Prosečna vrednost indeksa efikasnosti kroz različite vremenske prozore

U analizi sa prozorom dužine 7, koja služi za ispitivanje dugoročnih performansi država, dobijeni rezultati dodatno diferenciraju zemlje. Francuska i Švedska beleže prosečne indekse efikasnosti iznad 0.96, dok Rumunija ostaje sa vrednošću približnom 0.99 čak i u najdužem vremenskom intervalu. S druge strane, Luksemburg pada na vrednost od 0.51 u poslednjem prozoru, što predstavlja najniži indeks među svim analiziranim zemljama. Češka i Slovačka pokazuju pozitivne trendove, sa rastom indeksa od približno 0.69 ka 0.79, što ukazuje na postepenu stabilizaciju njihovih modela cirkularne ekonomije.

Srbija, iako ni u jednoj analizi nije dostigla indeks efikasnosti od tačno 1, beleži konstantno visoke vrednosti. U jednogodišnjem prozoru indeks je praktično konstantan (~0.99), dok u trogodišnjim prozorima varira između 0.945 i 0.999. U analizi sa dužinom prozora od 5 godina, indeks efikasnosti Srbije kreće se između 0.905 i 0.985, dok u sedmogodišnjim prozorima ne pada ispod 0.877. Ova postojanost performansi, uz blage padove u dužim vremenskim intervalima, može se tumačiti kao posledica rasta emisija ili povećanog uvoza sirovina, koji nisu u potpunosti kompenzovani rastom dodate vrednosti u vidu veće produktivnosti resursa. Ipak, činjenica da efikasnost u najdužem prozoru ostaje iznad 0.88 svedoči o otpornosti sistema cirkularne ekonomije i potencijalu za dugoročni prelazak na cirkularne prakse, uz dodatne strateške intervencije.

Pored pojedinačnih evaluacija, dodatna ključna zapažanja odnose se na grupne obrasce efikasnosti unutar geografskih i ekonomskih blokova. Baltičke zemlje, tj. Estonija, Letonija i Litvanija, pokazuju postojanu, ali skromnu efikasnost, sa indeksima najčešće u rasponu od 0.68 do 0.88, bez jasnog pomaka ka granici efikasnosti. Države srednje Evrope, poput Češke, Poljske i Slovačke, beleže blagi rast u dužim vremenskim intervalima, što može ukazivati na postepenu konsolidaciju i kontinuirano poboljšanje usvojenih praksi. Mediteranske zemlje, među kojima su Grčka, Italija i Portugalija, beleže visoke vrednosti indeksa u kraćim prozorima (često iznad 0.95), praćene fluktuacijama u analizama sa dužim intervalima, što se može povezati sa spoljnim zavisnostima i cikličnim ekonomskim uticajima. Mađarska i Hrvatska u kraćim prozorima dostižu gotovo savršenu efikasnost, dok u dužim režimima beleže vrednosti između 0.92 i 0.97, što ukazuje na povremene promene u praksama upravljanja resursima.

Sveobuhvatna analiza potvrđuje da kombinacija različitih vremenskih režima omogućava ne samo ocenu trenutnih performansi, već i detekciju trajnih obrazaca koji odražavaju institucionalnu stabilnost, fleksibilnost ekonomije i stratešku usmerenost ka održivoj potrošnji. Na taj način, kroz integrisanu analizu moguće je jasno razlikovati zemlje koje efikasnost postižu povremeno od onih koje je uspešno održavaju kroz vreme - među koje se, bez sumnje, ubraja i Srbija.

5. ZAKLJUČAK

Sprovedena analiza omogućila je sveobuhvatnu procenu efikasnosti zemalja Evropske unije i Srbije u upravljanju resursima u okviru cirkularne ekonomije primenom dinamičkog Window DEA BCC modela. Rezultati su pokazali značajne razlike u performansama među državama, kako u kraćim, tako i u dužim vremenskim intervalima. Posebno su iznenađujući rezultati za Srbiju, koja je demonstrirala vrlo visoke i stabilne performanse tokom čitavog posmatranog perioda, što ukazuje na postojanje institucionalnih i ekonomskih kapaciteta za održivu tranziciju ka cirkularnim praksama i ostvarivanje potpune efikasnosti. Suprotno tome, pojedine zemlje, poput Luksemburga i Estonije, pokazale su nisku i nestabilnu efikasnost, što ukazuje na potrebu za dodatnim strateškim intervencijama. Glavna prednost primenjenog pristupa ogleda se u mogućnosti uočavanja vremenskih obrazaca ponašanja i procene dugoročnih performansi sistema, dok je jedno od ograničenja oslanjanje na dostupne podatke i indikatore korišćene u analizi. Budući pravci istraživanja uključivali bi uvrštavanje drugih indikatora u analizu, koji su dostupni u okviru Eurostat baze i drugih izvora. Takođe, potencijalno bi bilo korisno razmotriti primenu Malmkvistovih indeksa za kvantifikaciju promene ukupne faktorske produktivnosti kroz vreme i identifikaciju faktora koji utiču na promenu produktivnosti.

LITERATURA

Banjerdpaiboon, A., & Limleamthong, P. (2023). Assessment of national circular economy performance using super-efficiency dual data envelopment analysis and Malmquist productivity index: Case study of 27 European countries. *Heliyon*, *9*(6), e16584. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16584

Bleischwitz, R., Yang, M., Huang, B., Xu, X., Zhou, J., McDowall, W., & Yong, G. (2022). The circular economy in China: Achievements, challenges and potential implications for decarbonisation. *Resources, Conservation and Recycling*, *183*, 106350. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106350

DRAFT VERZIJA

Bongers, A., & Casas, P. (2022). The circular economy and the optimal recycling rate: A macroeconomic approach. *Ecological Economics*, *199*, 107504. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107504

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, *2*(6), 429–444. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8

de Oliveira, C. T., & Oliveira, G. G. A. (2023). What circular economy indicators really measure? An overview of circular economy principles and sustainable development goals. *Resources, Conservation and Recycling*, *190*, 106850. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106850

Gerami, J., Mozaffari, M. R., Wanke, P. F., & Souza, F. B. de. (2022). A novel slacks-based model for efficiency and super-efficiency in DEA-R. *Operational Research*, *22*, 3373–3410. https://doi.org/10.1007/s12351-021-00679-6

Giannakitsidou, O., Giannikos, I., & Chondrou, A. (2020). Ranking European countries on the basis of their environmental and circular economy performance: A DEA application in MSW. *Waste Management*, *109*, 181–191. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.055

Horvat, A. M., Radovanov, B., Stojić, D., Sedlak, O., & Bobera, D. (2023). Assessing circular economy performance of European countries and Serbia using data envelopment analysis. *The European Journal of Applied Economics*, *20*(2), 1–11.

Ji, Y. B., & Lee, C. (2010). Data envelopment analysis. *The Stata Journal*, *10*(2), 267–280. https://doi.org/10.1177/1536867X1001000207

Marjanović, I., Stanković, J. J., Östh, J., Marković, M., & Stanojević, M. (2025). Insight into territorial efficiency of circular economy through data envelopment analysis. *Frontiers in Environmental Science*, *13*, 1494184. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1494184

Marques, A. C., & Teixeira, N. M. (2022). Assessment of municipal waste in a circular economy: Do European Union countries share identical performance? *Cleaner Waste Systems*, *3*, 100034. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100034

Meseguer-Sánchez, V., Gálvez-Sánchez, F. J., Molina-Moreno, V., & Wandosell-Fernández-de-Bobadilla, G. (2021). The main research characteristics of the development of the concept of the circular economy concept: A global analysis and the future agenda. *Frontiers in Environmental Science*, *9*, 704387. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.704387

Milanović, T., Savić, G., Martić, M., Milanović, M., & Petrović, N. (2022). Development of the waste management composite index using DEA method as circular economy indicator: The case of European Union countries. *Polish Journal of Environmental Studies*, *31*(1), 771–784. https://doi.org/10.15244/pjoes/139896

Nazarko, J., Chodakowska, E., & Nazarko, Ł. (2022). Evaluating the transition of the European Union member states towards a circular economy. *Energies*, *15*(11), 3924. https://doi.org/10.3390/en15113924

Neves, S. A., & Marques, A. C. (2022). Drivers and barriers in the transition from a linear economy to a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, *341*, 130865. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130865

Panwar, A., Olfati, M., Pant, M., & Snasel, V. (2022). A review on the 40 years of existence of data envelopment analysis models: Historic development and current trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *29*(3), 5397–5426.

Ratner, S. V., Lychev, A. V., Krivonozhko, V. E., & Balashova, S. A. (2025). Governmental effectiveness in the transition to a circular economy: Dynamic DEA model. *Unconventional Resources*, *6*, 100161. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100161

Rizos, V., Tuokko, K., & Behrens, A. (2017). The circular economy: A review of definitions, processes and impacts. *CEPS Papers*, (12440).

Tavera Romero, C. A., Castro, D. F., Ortiz, J. H., Khalaf, O. I., & Vargas, M. A. (2021). Synergy between circular economy and Industry 4.0: A literature review. *Sustainability*, *13*(8), 4331. https://doi.org/10.3390/su13084331

Velenturf, A. P., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 1437–1457. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018

Zhu, J. (2020). DEA under big data: Data enabled analytics and network data envelopment analysis. *Annals of Operations Research*. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03668-8

DRAFT VERZIJA

PRONALAŽENJE LOKACIJE STUDENTSKOG STANA UZ POMOĆ DEA METODE

SELECTING THE LOCATION OF A STUDENT APARTMENT USING DEA METHOD

ILIJA IVEZIĆ[1], BISERA ANDRIĆ GUŠAVAC[2]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, ii20210605@student.fon.bg.ac.rs
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, bisera.andric.gusavac@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-9438-5906

Rezime: *Ovaj rad se bavi problemom izbora optimalne lokacije studentskog stana na teritoriji beogradske opštine Voždovac, uz primenu metode analize obavijanja podataka (DEA). Cilj je bio da se identifikuju podlokacije koje omogućavaju najbolji odnos između troškova (cene mesečne kirije, udaljenost od fakulteta, spratnost) i kvaliteta stanova (broj soba, kvadratura, povezanost javnim prevozom). Korišćen je ulazno orijentisani CCR model koji omogućava procenu relativne efikasnosti za 26 podlokacija. Rezultati su pokazali da je 10 podlokacija efikasno, dok je preostalih 16 relativno neefikasno. Kako bi se suzio izbor na jednu lokaciju, kao pravac daljeg istraživanja predlaže se primena višekriterijumskih metoda odlučivanja MACBETH i OPA, koje omogućavaju uvođenje subjektivnih preferencija studenata i preciznije rangiranje lokacija.*

Ključne reči: *DEA metoda, CCR model, izbor lokacije, efikasnost, višekriterijumsko odlučivanje.*

Abstract: *This paper addresses the problem of selecting the optimal location for a student apartment in the municipality of Voždovac, Belgrade, using Data Envelopment Analysis (DEA). The goal was to identify sub-locations that offer the best balance between costs (monthly rent, distance to faculty, number of floors) and apartment quality (number of rooms, area, public transport connectivity). An input-oriented CCR model was applied to evaluate the relative efficiency of 26 sub-locations. The results identified 10 efficient and 16 inefficient sub-locations. To narrow the selection down to a single location, future research should consider the application of multi-criteria decision making methods such as MACBETH and OPA, which incorporate students' subjective preferences and enable precise ranking of alternatives.*

Keywords: *DEA method, CCR model, location selection, efficiency, multi-criteria decision-making.*

1. UVOD

Na državnim i privatnim univerzitetima u Republici Srbiji ukupno je upisano oko 210 000 studenata, od čega je 85% studenata upisano na državnim, dok je 15% studenata na privatnim fakultetima, prema (Republički zavod za statistiku, 2023). Najveći univerzitetski gradovi u Republici Srbiji jesu Beograd, Novi Sad i Niš, gde Beograd prednjači po broju upisanih studenata. Prema podacima prikazanim u studentskom vodiču (Univerzitet u Beogradu, n.d.), na Univerzitetu u Beogradu je upisano oko 90 000 studenata, od kojih se procenjuje da je između 30% i 40% došlo iz unutrašnjosti ili inostranstva, odnosno njih 31 500, po grubim procenama. Na teritoriji grada Beograda se nalazi 14 studentskih domova koji pokrivaju 10 500 mesta. Kandidati svake godine apliciraju za mesto i bivaju rangirani na osnovu uspehu postignutom u prethodnoj akademskoj ili školskoj godini, kao i socijalno-ekonomskog statusa porodice (Studentski centar Beograd, 2024). Preostala 21 000 studenata se svake godine suočava sa problemom pronalaženjem adekvatnog mesta za stanovanje, zato što je cilj naći željeni prostor maksimalnog kvaliteta po što nižoj ceni mesečne zakupnine.

Ovaj rad ima za cilj da pomogne studentima Fakulteta organizacionih nauka u odabiru lokacije studentskog stana na opštini Voždovac i da odgovor na pitanje koja podlokacija opštine Voždovac nudi optimalnu ravnotežu između dostupnosti, kvaliteta smeštaja i troškova stanovanja.

1.1. Trenutna situacija nekretnina na tržištu Republike Srbije

Tržište nekretnina u Republici Srbiji poslednjih godina prolazi kroz značajne promene uslovljene ekonomskim, demografskim i globalnim faktorima. Nakon perioda relativne stagnacije, beleži se ubrzan rast cena stambenih objekata, naročito u većim urbanim sredinama poput Beograda, Novog Sada i Niša. Povećana

DRAFT VERZIJA

potražnja za stanovima, manjak investicionih opcija, kao i inflatorni pritisci doprineli su intenziviranju građevinskih aktivnosti na ovim teritorijama.

U regionu Vojvodine i Beogradskom regionu, cene stanova su i više nego dvostruko veće za poslednjih sedam godina, a kada je reč o cenama novogradnje, dva severna regiona se jasno izdvajaju od južnih (Miljković & Rikalović, 2024). Beograd predstavlja najdinamičniji segment stambenog sektora u državi, kao glavni grad i administrativni, ekonomski i univerzitetski centar. Pozicionira se kao regionalni centar Zapadnog Balkana, što utiče i na porast kupovine stanova kao investicije, pa je samim tim i veća ponuda stanova za izdavanje.

Vrednost tržišta nepokretnosti u Republici Srbiji u 2024. godini iznosila je 7,4 milijardi evra, što predstavlja porast od 15% u odnosu na prethodnu godinu. Najveće ušešće u obimu novčanih sredstava ostvareno je na teritoriji grada Beograda, u iznosu od 3.531,1 milion evra, odnosno 47,6% (Republicki geodetski zavod, 2025). Prema učešću gradskih opština, opština Voždovac se nalazi na trećem mestu sa ukupnom vrednošću od 404,3 miliona evra u 2024. godini, gde je u izgradnji par velikih projekata, poput kompleksa „Nemanjin grad".

Iz svega što je prethodno rečeno, može se zaključiti da cene stanova i visine kirija na teritoriji grada Beograda imaju konstantan rast. Investitori se odlučuju za velike stambene projekte sa luksuznim stanovima i pratećim sadržajem, gde opštinu Voždovac pronalaze kao pogodnu za to. Nekadašnja industrijska zona i deo prve gradske zone Beograda, danas je predmet intenzivne urbanističke transformacije sa akcentom na stambene i infrastrukturne projekte. Prema istraživanju (CINS, 2025), najjeftiniji stan za izdavanje na ovoj Beogradskoj opštini je 120 evra mesečno, dok najskuplji dostiže cenu od čak 3500 evra. Kako se u ovom delu glavnog grada nalaze 4 drzavna fakulteta i 1 visoka škola, kao i par privatnih, postoji veliki broj studenata koji svake godine traži adekvatno mesto za život.

1.2. Problem odabira lokacije

Ekonomska analiza lokacije je započela sa Alfredom Veberom (1929), koji je razmatrao položaj fabrike na ravni između dva izvora resursa i jednog tržišta. Proučavajući kako inputi, resursi za fabrike, i outputi, proizvodi koji bi se prodavali na posmatranom tržištu, utiču na profit posmatrane fabrike, Alfred Veber je postavio osnove za dalja istraživanja o problemu odabira lokacije za objekte.

Problem odabira lokacije predstavlja jedan od izazova u domenu operacionih istraživanja i logistike, a njegovo rešavanje ima direktan uticaj na ekonomičnost i efikasnost različitih sistema. Ovaj problem podrazumeva identifikaciju optimalnih geografskih pozicija za postavljanje jednog ili više objekata (npr. bolnica, škola, distributivnih centara ili proizvodnih pogona), uzimajući u razmatranje raspoložive resurse, tražnju korisnika, prostorna ograničenja i ciljnu funkciju (najčešće minimizaciju ukupnih troškova ili maksimizaciju dostupnosti usluga). Značaj formalizacije ovog problema jeste u racionalizaciji troškova i optimalnoj raspodeli resursa, što pomaže strateškom planiranju i donošenju odluka unutar posmatranog preduzeća.

Donosilac odluke bira jednu alternativu iz skupa međusobno isključivih opcija, pri čemu svaka od njih pruža određeni nivo korisnosti. Izbor se vrši tako što se bira ona alternativa koja maksimizira subjketivno percipiranu korisnost (Schirmer, van Eggermond, & Axhausen, 2014). Priliv velikog broja stanovnika u Evropu proteklih godina predstavlja izazov za mlade u odabiru adekvatnog mesta za život. Ljudi zavise od velikog broja svakodnevnih aktivnosti koje lokacijski nisu usklađene, dok se novac za nekretnine posmatra kao strateško ulaganje, pa je problem odabira lokacije stambene jedinice višedimenzionalan i zahteva uravnoteženo razmatranje funkcionalnih potreba u svakodnevnom životu i dugoročnih ekonomskih aspekata.

Rad je strukturiran na sledeći način: sekcija 2 opisuje metodu višekriterijumskog odlučivanja koja se koristi za procenu alternativa po kriterijumima. U sekciji 3 su predstavljeni rezultati studije slučaja. Pravac daljeg istraživanja i glavni zaključci su opisani u sekciji 4.

2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA (DEA)

U 21. veku više pažnje u proizvodnim i uslužnim organizacijama posvećuje se stvaranju vrednosti uz minimalno ulaganje resursa, odnosno maksimalnoj efikasnosti. Efikasnost opisuje u kojoj meri su resursi dobro korišćeni za namenjenu svrhu, merljiv je koncept i kvantitativno određuje odnos izlaza u odnosu na ulaze. Kako bi se omogućilo merenje relativne efikasnosti na osnovu više ulaznih i izlaznih kriterijuma, kreirana je Analiza obavijanja podataka (Charnes et al., 1978).

Analiza obavijanja podataka, odnosno DEA metoda, na osnovu podataka o ulazima i izlazima omogućava „evaluaciju performansi skupa istorodnih organizacionih jedinica, jedinica o kojima se odlučuje (*Decision Making Unit – DMU*)" (Li & Xu, 2008). Za primenu metode je potrebno identifikovati bazu podataka i cilj istraživanja. Baza podataka mora sadržati određeni skup jedinica odlučivanja, kao i ulazne i izlazne kriterijume za svaku od njih. Cilj istraživanja zavisi od tipa problema, maskimizacije ili minimizacije. Razlikujemo dva

DRAFT VERZIJA

osnovna DEA modela – CCR model koji podrazumeva konstantan prinos na obim i BCC model koji podrazumeva varijabilni prinos na obim (Mikušová, 2015). Oba modela mogu da budu ulazno- i izlazno-orijentisana.

Matematička formulacija ulaznog CCR DEA modela sa konstantnim prinosom na obim je data u obliku:

(max) $h_k = \sum_{r=1}^{s}(u_r y_{rk})$

p.o.

$\sum_{i=1}^{m}(v_i x_{ik}) = 1$

$\sum_{r=1}^{s}(u_r y_{rj}) - \sum_{i=1}^{m}(v_i x_{ij}) - \leq 0,$ j=1,...,n

$u_r \geq 0$; r=1,2,...,s

$v_i \geq 0$; i=1,2,...,m

gde je x_{ik} nivo ulaza *i* jedinice odlučivanja *k*, a y_{rk} je nivo izlaza *r* jedinice odlučivanja *k*.

Rezultati dobijeni nakon primene DEA metode jesu broj efikasnih i razlikovanje efikasnih od neefikasnih jedinica odlučivanja. Kako bi se DEA metoda primenila na adekvatan način, broj kriterijuma mora biti barem tri puta veći od broja jedinica odlučivanja uključenih u model. Veći broj kriterijuma dovodi do većeg broja efikasnih jedinica odlučivanja, pa su nekada rezultati ove metode nedovoljni za donošenje strateških odluka unutar organizacije (Jenkins & Anderson, 2003). Jedan od načina za poboljšanje diskriminacione moći modela je ponovno i pažljivo biranje ulaznih i izlaznih kriterijuma, odnosno njihova redukcija.

Primena analize obavijanja podataka DEA je sprovedena u studiji koja se bavi istraživanjem izbora lokacije stanova studenata Fakulteta organizacionih nauka na opštini Voždovac u Beogradu, Srbija.

3. REZULTATI PRIMENE

U istraživanju je primenjen ulazno-orijentisani CCR model (CCR-I), kojim se procenjuje relativna efikasnost podlokacija na osnovu više ulazno-izlaznih promenljivih. Cilj analize bio je da se utvrdi koje podlokacije efikasno koriste dostupne resurse u cilju ostvarenja izlaznih performansi. U kontekstu opisanog problema u radu, model daje odgovor na pitanje na kojoj podlokaciji je potrebno da se student fokusira u potrazi za stanom, uzimajući u obzir resurse koje poseduje i želje koje ima.

Studija uključuje 26 podlokacija opštine Voždovac, koje su analizirane po 6 kriterijuma, tri ulazna i tri izlazna:

- 1. Cena mesečne kirije (ulazni) – prosečna cena svih dostupnih stanova za izabranu podlokaciju na posmatranom sajtu;
- 2. Udaljenost od fakulteta (ulazni) - udaljenost u kilometrima od centra podlokacije do zgrade fakulteta;
- 3. Spratnost (ulazni) – prosečna spratnost svih dostupnih stanova na izabranoj podlokaciji;
- 4. Broj direktnih autobuskih linija do fakulteta (izlazni);
- 5. Kvadratura (izlazni) – prosečna kvadratura svih dostupnih stanova za izabranu podlokaciju na posmatranom sajtu;
- 6. Potreban broj soba (izlazni) – prosečan broj soba svih dostupnih stanova za izabranu podlokaciju na posmatranom sajtu;

Kao izvori podataka su korišćeni relevantni internet sajtovi *Halo oglasi*, *GSP Beograd* i *Google maps*. *Halo oglasi* su korišćeni za istraživanje o samim karakteristikama stanova, kao najveći katalog nekretnina u Srbiji. *GSP Beograd* poseduje bazu linija gradskog prevoza odakle su povučeni podaci za broj direktnih linija od fakulteta do svake od podlokacija. *Google maps* je služio za dobijanje podataka o udaljenosti fakulteta od svake podlokacije.

Statistička analiza ulazno-izlaznih podataka omogućava bolje razumevanje raspodele podataka, raspona vrednosti i potencijalnih odstupanja, što može imati značajan uticaj na oblikovanje efikasne granice i interpretaciju rezultata. Analiza obuhvata osnovne deskriptivne pokazatelje za sve promenljive: minimalnu i maksimalnu vrednost, prosečnu vrednost (aritmetička sredina) i standardnu devijaciju.

RADNA VERZIJA

Tabela 1: Statistička analiza i korelacija između ulaznih i izlaznih podataka

Statistika: ulazno-izlazni podaci

	I1	I2	I3	O1	O2	O3
Maksimalna vrednost	700	5	8,60894853	6	60	2,67
Minimalna vrednost	0,00001	0,6	0,69599799	0,00001	40,83	1,5
Prosek	503,544616	1,98846154	3,61845676	2,115388462	49,58307692	1,98307692
Standardna devijacia	172,075172	1,17090594	2,16493024	1,98700996	5,107612546	0,3115565

Korelacija: ulazno-izlazni podaci

	I1	I2	I3	O1	O2	O3
Prosečna cena mesečne kirije (I1)	1	-0,1340961	0,07340949	0,257959049	-0,03660962	0,03258603
Udaljenost od fakuleta (I2)		1	-0,08839776	-0,39287005	0,148969999	0,27880385
Prosečna spratnost (I3)			1	0,118111406	0,186378543	-0,01967338
Broj direktnih autobuskih linija do fakulteta (O1)				1	0,116536198	0,19885741
Kvadratura (O2)					1	0,58834582
Potreban broj soba (O3)						1

Podaci dati u Tabeli 1 pružaju uvid u to koje promenljive imaju veću varijaciju među jedinicama odlučivanja, odnosno koje doprinose razlikovanju efikasnosti, a koje promenljive su relativno ujednačene i time imaju ograničen doprinos modelu.

Korelacija između promenljivih unutar DEA modela predstavlja značajan aspekt koji može uticati na kvalitet procene efikasnosti. Visoka korelacija među ulaznim promenljivim može ukazivati na postojanje redundantnosti podataka, što može narušiti pouzdanost modela. Korelacija između ulaza i izlaza omogućava proveru relevantnosti odabranih ulaznih kriterijuma u odnosu na performanse jedinica odlučivanja. Razumevanje korelacionih odnosa između ulaza i izlaza pomaže u interpretaciji dobijenih rezultata efikasnosti, jer otkriva koje ulazne dimenzije najviše utiču na postizanje određenih nivoa izlaza.

Prirodno je da odnos ulaza i izlaza bude pozitivno korelisan (sa više ulaganja dobijamo više rezultata). Iz Tabele 1 se može videti da se javlja negativna vrednost u 3 slučaja:

- 1. Prosečna cena mesečne kirije (I1) – Kvadratura (O2): može biti objašnjeno velikim prisustvom novogradnje na opštini Voždovac, odnosno da su stariji stanovi manje dostupni i manje privlačni tržištu;
- 2. Udaljenost of fakulteta (I2) – Broj direktnih autobuskih linija do fakulteta (O1): koncept gradskog prevoza je takav da se većom udaljenošću od gradskog jezgra smanjuje broj direktno povezanih lokacija centra sa periferijom;
- 3. Prosečna spratnost (I3) – Potreban broj soba (O3): na opštini Voždovac je na mestima porodičnih kuća uočljiva izgradnja visokih zgrada sa stanovima manje kvadratura (zbog zemljišta inicjalne namene za niže stambene objekte), kao i kompleksa sa velikim brojem stanova različite kvadrature. Visoka spratnost je manje privlačna kupcima, tako da se investitori na višim spratovima odlučuju za manje stanove sa raznovrsnom namenom (mladi parovi, samci i studenti).

U tabeli rezultata efikasnosti, prikazane su ocenjene vrednosti (score) za svaku podlokaciju. Ocena 1 označava potpunu efikasnost, dok vrednosti manje od 1 ukazuju na relativnu neefikasnost. U Tabeli 2 su prikazani rezultati efikasnosti po podlokacijama u opadajućem redosledu, kao i rank koji svaka podlokacija nosi.

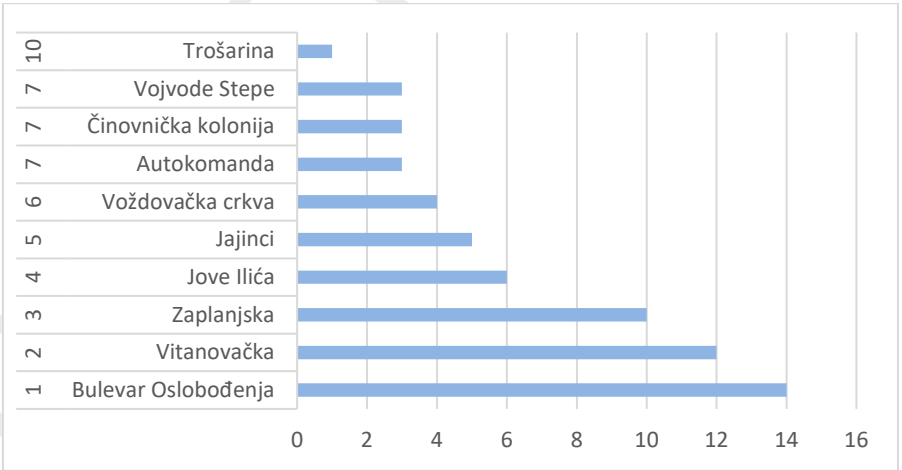
DRAFT VERZIJA

Tabela 2: Rezultati efikasnosti i rangiranje podlokacija

No.	DMU	Score	Rang	No.	DMU	Score	Rang
1	Autokomanda	1	1	23	Lekino brdo	0,8098	14
9	Trošarina	1	1	13	Kumodraška	0,7922	15
12	Bulevar Oslobođenja	1	1	18	Saobraćajni fakultet	0,7216	16
14	Voždovačka crkva	1	1	20	Darvinova pošta	0,7057	17
15	Vitanovačka	1	1	8	Kumodraž	0,7041	18
16	Jove Ilića	1	1	6	Naselje Braće Jerković	0,6603	19
19	Činovnička kolonija	1	1	7	Naselje Stepa Stepanović	0,5927	20
22	Jajinci	1	1	10	Banjica	0,5635	21
25	Vojvode Stepe	1	1	21	Farmaceutski fakultet	0,5428	22
26	Zaplanjska	1	1	24	TC Stadion	0,5395	23
17	Bilećka	0,9962	11	5	Vojvode Vlahovića	0,4404	24
4	Medaković 2	0,8735	12	2	Dušanovac	0,4106	25
11	Bioskop Voždovac	0,8338	13	3	Konjarnik	0,315	26

Iz Tabele 2 se može videti da je prisutno 10 efikasnih podlokacija koje imaju ocenu 1, što je oko 40% od ukupnog broja jedinica odlučivanja. Relativno neefikasnih podlokacija je 16 i imaju ocenu manju od 1, što je oko 60% od ukupnog broja jedinica odlučivanja. Ocena manja od 1, koju imaju ove jedinice odlučivanja, ukazuje na stepen neefikasnosti, odnosno koliki je prostor za proporcionalno smanjenje ulaza bez smanjenja izlaza. Najniže rangirana podlokacija je „Konjarnik“ i ima rang 26.

Za svaku neefikasnu podlokaciju, algoritam DEA metode pronalazi jednu ili više efikasnih podlokacija koje čine njenu konveksnu kombinaciju i zajedno definišu ciljnu poziciju na efikasnoj granici. Taj skup predstavlja skup uzornih lokacija koje se koriste kao benchmark za unapređenje performansi posmatrane neefikasne podlokacije. Sa Slike 1 se može videti da rang 1 ima podlokacija „Bulevar Oslobođenja“, koja je korišćena 14 puta, a rang 10 podlokacija „Trošarina“, koja se pojavila u jednom slučaju. Zanimljivo je da rang 7 imaju 3 podlokacije, s'obzirom da su sve korišćene po 3 puta.



Slika 1: Grafik koji predstavlja broj pojavljivanja uzornih jedinica odlučivanja

4. ZAKLJUČAK

Istraživanje predstavljeno u ovom radu pokazuje da se problem izbora optimalne lokacije za studentski stan može uspešno analizirati primenom metode obavijanja podataka, DEA metode, konkretno ulazno orijentisanog CCR modela. Na primeru opštine Voždovac, identifikovano je 10 efikasnih i 16 relativno neefikasnih podlokacija, što ukazuje na značajne razlike u korišćenju dostupnih resursa u cilju postizanja željenih izlaznih performansi.

Dobijeni rezultati omogućavaju studentima bolji uvid u to koje lokacije nude optimalan balans između cene, dostupnosti i kvaliteta stanova. Pored toga, metoda omogućava kreiranje referentnih tačaka (benchmark) za podlokacije koje su ocenjene kao neefikasne, pružajući konkretne smernice za unapređenje.

Jedan od uočenih izazova jeste činjenica da DEA metoda identifikuje više (u ovom slučaju 10) efikasnih jedinica odlučivanja, a ne jednu najbolju opciju. Kako bi se dodatno unapredio proces donošenja odluke i omogućio izbor tačno jednog najpovoljnijeg stana, kao smernice za buduće istraživanje predlažu se korišćenje višekriterijumskih metoda odlučivanja, kao što su metoda za merenje atraktivnosti na osnovu kategorijalne evaluacije (MACBETH) i metoda pristupa ordinalnih prioriteta (OPA). Ove metode omogućavaju uključivanje subjektivnih preferencija korisnika, u ovom slučaju studenata, i podržavaju izbor jedne, najefikasnije alternative u skladu sa njegovim ličnim prioritetima.

LITERATURA

Republički zavod za statistiku. (2023, oktobar 6). *Upisani studenti*. https://www.stat.gov.rs/sr-latn/vesti/statisticalrelease/?p=14042

Univerzitet u Beogradu. (n.d.). *Vodič za studente*. https://www.bg.ac.rs/vodic-za-studente/

Studentski centar Beograd. (2024). *Konkurs za prijem studenata 2024/2025*. Preuzeto 3. juna 2025, sa https://www.sc.rs/obavestenja/konkurs-za-prijem-studenata-2024-2025

Miljković, M., & Rikalović, G. (2024). Tržište stanova u Srbiji – segmentiranost, arbitraža i efikasnost. *Industrija*, 52(3), 283-300. https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/1450-863X/2024/1450-863X2403283M.pdf

Republički geodetski zavod. (2025). Godišnji izveštaj 2024 – *finansi* [PDF]. Republika Srbiji. https://www.rgz.gov.rs

Centar za istraživačko novinarstvo Srbije (CINS). (2025, 3. februar). *Iznajmljivanje stana u Beogradu za mnoge teret*. https://www.cins.rs/iznajmljivanje-stana-u-beogradu-za-mnoge-teret/

Weber, A. (1929). *The Theory of the Location of Industries* (prvobitno objavljeno 1909.). Chicago: University of Chicago Press.

Schirmer, P. M., van Eggermond, M. A. B., & Axhausen, K. W. (2014). *The role of location in residential location choice models: A review of literature*. *Journal of Transport and Land Use, 7*(2), 3–21. https://doi.org/10.5198/jtlu.v7i2.740

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, *2*(6), 429-444. https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8

Li, X., & Xu, L. (2008). A DEA-based method for supplier selection in e-marketplaces. *International Journal of Production Economics, 111*(2), 105–113. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.025

Jenkins, L., & Anderson, M. (2003). A multivariate statistical approach to reducing the number of variables in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research, 147*(1), 51–61. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00243-6

Mikušová, P. (2015). An application of DEA methodology in efficiency measurement of the Czech public universities. Procedia Economics and Finance, 25, 569–578. https://doi.org/10.1016/s2212-5671(15)00771-6

RADNA VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

ANALIZA PERFORMANSI BAZA PODATAKA ZA OBRADU GPS PODATAKA

PERFORMANCE ANALYSIS OF DATABASE SYSTEMS FOR GPS DATA PROCESSING

PETAR LAKČEVIĆ[1], SINIŠA VLAJIĆ[2]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, petar.lakcevic@fon.bg.ac.rs, 0009-0002-4457-9248
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, sinisa.vlajic@fon.bg.ac.rs, 0000-0003-3830-2170

Rezime: *Ovaj rad se zasniva na komparativnoj analizi tri popularne baze podataka – MongoDB, TimescaleDB i InfluxDB za skladištenje i analizu realnih GPS podataka prikupljenih iz aplikacije za nadzor i praćenje voznog parka. Skup podataka obuhvata standardne geoprostorne informacije poput geografske širine, geografske dužine i vremena zapisa, kao i dodatne senzorske podatke vozila, uključujući brzinu, nivo baterije i temperaturu. Cilj ovog rada je procena performansi svake od ovih baza podataka u obradi prostorno-vremenskih informacija i njihove primenljivosti u sistemima koji obrađuju velike količine podataka. Referentna merenja se zasnivaju na direktnim, prilagođenim upitima, izvršavanim bez upotrebe ORM alata (Object-Relational Mapping) ili drugih slojeva apstrakcije, kako bi se izmerile sirove mogućnosti pomenutih baza podataka. Testiranja su sprovedena u kontrolisanim uslovima korišćenjem unificiranog modela i količine podataka prilikom čega su prikupljeni metrički pokazatelji kao što su vreme izvršavanja upita, efikasnost skladištenja, kao i stabilnost performansi pod opterećenjem. Dobijeni rezultati pružaju uvid u prednosti i ograničenja ciljanih baza podataka, kao i u kompromise između opštih i vremenski optimizovanih rešenja sa naglaskom na njihovu primenu u GPS praćenju.*

Ključne reči: *GPS podaci, baze podataka, performanse, komparativna analiza.*

Abstract: *This paper is based on a comparative analysis of three popular databases - MongoDB, TimescaleDB and InfluxDB for storing and analyzing real GPS data collected from a fleet monitoring and tracking application. The dataset includes standard geospatial information such as latitude, longitude and time of record, as well as additional vehicle sensor data including speed, battery level and temperature. The aim of this paper is to evaluate the performance of each of these databases in the processing of spatio-temporal information and their applicability in systems that process large amounts of data. Benchmark measurements are based on direct, customized queries, executed without the use of ORM tools (Object-Relational Mapping) or other abstraction layers, in order to measure the raw capabilities of said databases. Testing was conducted under controlled conditions using a unified model and volume of data where metrics such as query execution time, storage efficiency, and performance stability under load were collected. The obtained results provide an insight into the advantages and limitations of targeted databases, as well as into the compromises between general and time-optimized solutions with an emphasis on their application in GPS tracking.*

Keywords: *GPS data, database systems, performance, comparative analysis.*

DRAFT VERZIJA

1. UVOD

Vremensko-prostorni podaci predstavljaju skup informacija koji kombinuje geografske koordinate (geografska dužina, geografska širina) sa vremenom (timestamp) kada je ta lokacija zabeležena. U zavisnosti od primene, vremensko-prostorni podaci često mogu biti obogaćeni dodatnim informacijama. Ove dodatne informacije najčešće zavise od oblasti primene i mogu obuhvatati podatke poput brzine kretanja vozila u saobraćaju, temperature i vlažnosti vazduha u meteorologiji, gustine naseljenosti u demografiji kao i mnogih drugih.

Poslednjih godina, količina vremensko-prostornih podataka je u eksponencijalnom rastu. Glavni pokretač ovog trenda je tehnološki napredak (Lee & Lee, 2015). Mobilni telefoni i IoT uređaji sa ugrađenim GPS

modulima su postali standard današnjice, a pokrivenost brzim mobilnim mrežama u većini zemalja premašuje 95. percentil (Wang et al., 2020).

Paralelno s tim, nagli razvoj cloud infrastrukture i pad cena skladišnog prostora motivisali su korisnike da čuvaju sve više generisanih podataka.

Prostorno-vremenski podaci primenu pronalaze u mnogim oblastima. Ove oblasti uključuju avio industriju, pametne gradove, praćenje flota vozila, nadzor saobraćaja, urbano planiranje, poljoprivredu, kao i mnoge druge sfere.

Cilj ovog istraživanja je komparativna analiza MongoDB, TimescaleDB i InfluxDB - tri često korišćene baze za rad sa prostorno-vremenskim podacima. Fokus istraživanja je na evaluaciji performansi ovih baza pri skladištenju i izvršavanju analitičkih operacija nad takvim podacima.

2. PREGLED BAZA PODATAKA I TEHNOLOŠKI OKVIR

Ovo poglavlje predstavlja pregled sistema baza podataka korišćenih u komparativnoj analizi ovog istraživanja. Svaka od ovih baza poseduje specifične prednosti i mane u kontekstu upravljanja prostorno-vremenskim podacima. Dodatno, u cilju obezbeđivanja ravnopravnog testnog okruženja, sve baze su pokrenute u Docker kontejnerima. Za vizualizaciju podataka i osnovno praćenje performansi korišćena je Grafana.

2.1. MongoDB

MongoDB je dokumentno orijentisana NoSQL baza koja koristi BSON (Binary JSON) format za skladištenje podataka. Pogodna je za rad sa nestruktuiranim i polustruktuiranim podacima (Chodorow & Dirolf, 2010). Ovo ga čini čestim izborom za sisteme koji koriste prostorno-vremenske podatke, posebno u slučajevima kad se podaci generišu iz više različitih izvora sa promenljivom strukturom. MongoDB takođe nudi ugrađenu podršku za GeoJSON format koji olakšava implementaciju geolokacijskih upita (kao što su $geoWithin, $geoIntersects i $near). Ova funkcionalnost je korišćena u komparativnoj analizi.

2.2. TimescaleDB

TimescaleDB je izrađena kao specijalizovana ekstenzija PostgreSQL sa primarnim fokusom na upravljanju podacima vremenskih serija. To postiže konceptom “hypertables”, koji predstavlja apstraktni sloj koji u pozadini automatski upravlja particionisanjem podataka u manje, vremenski organizovane segmente. Ovakva arhitektura omogućava efikasno skladištenje i brzu analizu vremenskih podataka dok zadržava potpunu SQL kompatibilnost (Shen et al., 2019). Kako bi se vremenske serije kombinovale sa geolokacijskim podacima, koristi se PostGIS ekstenzija. Ova ekstenzija pruža napredne funkcionalnosti za rad sa prostornim podacima i korišćena je u ovom istraživanju.

2.3. InfluxDB

InfluxDB je vremenski orijentisana, NoSQL baza podataka. Specijalizovana je za visoko-frekventne vremenske podatke. Svoju primenu često pronalazi u IoT sistemima, finansijskim tržištima, smart-home aplikacijama i drugim oblastima gde je ključno beležiti podatke u kontinuitetu (Ahmad & Ansari, 2017). Za razliku od klasičnih relacionih baza, InfluxDB prilikom skladištenja podataka koristi specifičan model merenja, oznaka i vrednosti uz vremensku oznaku kao obavezan element zapisa. Ovaj pristup omogućava efikasnu kompresiju kao i visoke performanse upita i agregacija.

2.4. Verzije

Prilikom komparativne analize, korišćene su sledeće verzije softvera:

- MongoDB: mongo:6.0
- TimescaleDB: timescale/timescaledb:2.11.1-pg14
- InfluxDB: influxdb:2.7
- Docker Engine: 24.0.2

Ove verzije su skinute sa zvaničnog Docker Hub repozitorijuma i nisu menjane u procesu testiranja. Sve verzije odgovarale su najnovijim stabilnim izdanjima u trenutku sprovođenja istraživanja.

DRAFT VERZIJA

3. OPIS METODOLOGIJE I EKSPERIMENATA

Svi testovi vršeni su na istoj mašini hosting providera - Digital Ocean. Konkretna mašina korišćena u istraživanju koristi Ubuntu 24.10 x64, sa dva virtuelna AMD procesora, 8GB ram memorije i 80GB SSD prostora. Smeštena je u datacentru u Frankfurtu. Okruženje je konfigurisano isključivo za postizanje stabilnih uslova i ponovljivih rezultata pri testiranju pomenutih baza podataka.

Svi sistemi baza podataka (MongoDB, TimesacaleDB i InfluxDB) su podignuti u izolovanim Docker kontejnerima. Korišćene su poslednje stabilne Docker slike dostupne u vreme sprovođenja istraživanja. Podešavanje je podrazumevalo i optimalno indeksiranje i konfiguracije šeme u cilju oponašanja realnog produkcionog okruženja.

Podaci korišćeni u istraživanju dobijeni su iz nekoliko postojećih aplikacija za nadzor i praćenje voznog parka. Aplikacije iz kojih su podaci preuzeti beleže standardne geoprostorne informacije (geografska širina, geografska dužina, vremenska oznaka) za svaku zabeleženu tačku. Pored toga, s obzirom na varijacije u broju dodatnih senzorskih podataka među različitim izvorima, za potrebe testiranja usvojen je prosečan broj dodatnih atributa kako bi se osigurao reprezentativan i ujednačen model zapisa. Inicijalni set podataka prebačen je u sve tri baze podataka pomoću prilagođenog ETL procesa implenetiranog u Java programskom jeziku.

Da bi se procenile sirove performanse ovih baza, svi upiti i sva merenja vršena su direktno preko izvornih interfejsa ovih baza podataka. Za TimescaleDB korišćen je psql, za MongoDB korišćen je monogsh dok je za InfluxDB korišćen Flux HTTP API. Ovaj pristup eliminiše potencijalne troškove performansi koje uvode ORM alati, mrežne apstrakcije i ostali slojevi serijalizacije (Zhao & Truhlar, 2005).

Aktivnosti baze podataka i korišćenje ostalih sistemskih resursa praćeni su direktno kroz Ubuntu sistem kao i korišćenjem Grafane. Pokretanje testova je bilo dozvoljeno samo kada je zauzetost procesora ostala u odstupanju od 1% od kontrolnih testova.

Svaki testni upit je izvršen deset puta. Prosečna vrednost iz ovih ponavljanja je uzeta za analizu. Testovi su ponavljani na tri različita seta podataka (10.000 zapisa, 100.000 zapisa i 1.000.000 zapisa) u cilju uočavanja trendova skalabilnosti i performansi.

Proces komparacije je sadržao sledeće scenarije:

- Merenje efikasnosti skladištenja na disku
- Vreme unošenja jednog zapisa
- Vreme preuzimanja 100 najnovijih zapisa
- Vreme izvršenja upita baziranog na vremenu (preuzimanje podataka iz određenih 10 minuta)
- Vreme izvršenja prostorno-vremenskog upita (brojanje zapisa unutar geo-ograde u definisanom vremenskom opsegu)
- Vreme izvršenja upita o neindeksiranim poljima

Ovi scenariji su izabrani jer održavaju uobičajene operacija u GPS sistemima (Neteler et al., 2011). Cilj ovih scenarija je razotkrivanje razlika u tome kako svaka baza podataka rukuje prostorno-vremenskim podacima pod različitim opterećenjima.

4. ANALIZA I INTERPRETACIJA REZULTATA

Testiranje performansi je sprovedeno u skupovima podataka od 10.000, 100.000 i 1.000.000 zapisa. Ključne metrike su uključivale efikasnost skladištenja, kašnjenje unošenja zapisa i performanse upita za tipične operacije GPS praćenja.

InfluxDB pokazao je izuzetnu efikasnost pri skladištenju, koristeći svega 7 MB za čuvanje million zapisa. Čuvanje identičnih podataka u MongoDB sistemu zahtevalo je 153MB, dok je TimescaleDB zahtevao nešto više od 305MB. Važno je napomenuti da i MongoDB i TimescaleDB pokazuju gotovo linearan rast zauzeća prostora, ali TimescaleDB ima nešto veći početni overhead zbog metapodataka.

U testu unošenja jednog zapisa, MongoDB je ostvarivao najbolje vreme na malim razmerama, ali je značajno degradirao kako se veličina skupa podataka povećavala. TimescaleDB je zadržavao konzistentne performanse pri svim veličinama skupova podataka, dok je InfluxDB beležio kontinuirani pad performansi, koji je čak izraženiji nego kod MongoDB-a.

TimescaleDB je konzistentno pružao najbolje performanse prilikom preuzimanja 100 poslednjih zapisa, održavajući nisko kašenjenja čak i na najvećem skupu podataka. InfluxDB je pokazao značajno degradiranje performansi rastom broja podataka, dok je MongoDB pokazao umereno usporavanje.

RAD U VERZIJA

U testovima baziranim na vremenu i prostoru InfluxDB značajno je nadmašio druge dve baze. To je dodatno izraženo u testovima većih razmera. TimesacleDB ponudio je solidne performanse, dok je MongoDB iskusio značajno kašnjenje rastom seta podataka.
TimescaleDB pružio je najbolje rezultate pri filtriranju prema neindeksiranim poljima. MongoDB i InfluxDB pokazali su povećano kašenjenje, pri čemu je MongoDB pokazao najgori učinak na najvećem setu podataka.

Rezultati poređenja ovih baza podataka prikazani su u tablama ispod:

Tabela 1: Rezultati za 10.000 zapisa

Test	Timescale	Mongo	Influx
Skladištenje	3MB	1.44MB	0.216MB
Unos	29.47ms	11ms	80ms
Poslednjih 100	4.278ms	5ms	160ms
Određenih 10 min	31ms	51ms	20ms
Broj (geo+vreme)	4ms	10ms	11.5ms
Bez indeksa	7ms	20ms	17.5ms

Tabela 2: Rezultati za 100.000 zapisa

Test	Timescale	Mongo	Influx
Skladištenje	47MB	14.7MB	1.2MB
Unos	39ms	35ms	110ms
Poslednjih 100	5.02ms	15ms	224ms
Određenih 10 min	45ms	69ms	26ms
Broj (geo+vreme)	9ms	23ms	13ms
Bez indeksa	14ms	47ms	39ms

Tabela 3: Rezultati za 1.000.000 zapisa

Test	Timescale	Mongo	Influx
Skladištenje	305MB	153MB	7MB
Unos	46ms	159ms	290ms
Poslednjih 100	4.6ms	89ms	590ms
Određenih 10 min	359ms	1.1s	39ms
Broj (geo+vreme)	47ms	129ms	17.7ms
Bez indeksa	39ms	98ms	105ms

Rezultati komparativne analize ukazuju na prednosti i mane analiziranih baza podataka. InfluxDB prednjači u efikasnosti skladištenja (kompresiji) kao i u upitima baziranim na vremenu. MongoDB, osim pružanja najveće fleksibilnosti, radi najbolje na malim umetcima i filterima za kratko vreme, ali doživlajava usporavanja u većim vremenskim baziranim upita. TimescaleDB dosledno ostvaruje visoke performanse u operacijama preuzimanja najnovijih podataka, izvršavanju geo-upita, brojanju zapisa i filtriranju po neindeksiranim atributima.

5. ZAKLJUČAK

Ova komparativna analiza, pokazala je da su upoređeni sistemi baza podataka, uprkos njihovim arhitekturalnim razlikama, veoma sposobni da efikasno obrade prostorno-vremenske podatke.

DRAFT VERZIJA

- **InfluxDB -** prednjači u efikasnosti skladištenja (kompresiji podataka) kao i u efikasnosti prostorno-vremenskih upita naročito na velikim setovima podataka.
- **MongoDB -** pruža fleksibilnost u obradi nestruktuiranih podataka i odlične performanse na manjim setovima podataka, ali pokazuje degradaciju performansi pri većem opterećenju
- **TimescaleDB –** iako zauzima najviše prostora, pruža najstabilnije i najpredvidljivije performanse u svim tipovima upita.

Zanimljiva opservacija je da TimescaleDB veoma efikasno rukuje nedostajućim (null) vrednostima. Iako zahteva eksplicitno definisanu šemu i kreiranje tabele sa svim potencijalnim poljima, neiskorišćena polja i nedostajuće vrednosti zauzimaju minimalno memorijskog prostora. Ovime se TimescaleDB pozicionira u uži izbor i za sisteme sa velikim brojem nedostajućih vrednosti.

Svaka od ovih baza podataka ima izražene prednosti i ograničenja, ali se ni jedna ne pokazuje kao apsolutni pobednik u kontekstu skladištenja i analize podataka GPS sistema.

Budući pravci istraživanja mogli bi da uključe dodatne sistema baza podataka kao što je ClickHouse, koji je poznat po analitici visokih performansi. Takođe, evaluacija performansi bi se mogla proširiti na dodatne testove, kao što su istovremeni upiti, replikacija pod opterećenjem, efikacnosti keširanja podataka. Ovi testovi doprineli bi detaljnijem uvidu u robusnost ovih rešenja u kontekstu GPS sistema.

Na kraju, može se zaključiti da su savremena rešenja, zahvaljujući brojnim ekstenzijama, formatima i alatima, postala izutetno sposobna za rad sa velikim brojem GPS podataka. Izbor odgovarajuće baze podataka za konkretan GPS sistem bi trebalo zasnivati na jasno definisanim potrebama i opterećenjima ciljanog sistema.

LITERATURA

Ahmad, K., & Ansari, M. (2017). Hands-On InfluxDB. Chapman and Hall/CRC eBooks. https://doi.org/10.1201/9781315155579-20

Chodorow, K., & Dirolf, M. (2010). MongoDB: The Definitive Guide. O'Reilly Media.

Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. Business Horizons, 58(4), 431–440. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008

Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., & Metz, M. (2011). GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. Environmental Modelling & Software, 31, 124–130. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.014

Shen, L., Lou, Y., Chen, Y., Lu, M., & Ye, F. (2019). Meteorological sensor data storage mechanism based on TimescaleDB and Kafka. In Communications in Computer and Information Science (pp. 137–147). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0118-0_11

Wang, J., Gao, Y., Zhou, C., Sherratt, R. S., & Wang, L. (2020). Optimal coverage multi-path scheduling scheme with multiple mobile sinks for WSNs. Computers, Materials & Continua, 62(2), 695–711. https://doi.org/10.32604/cmc.2020.08674

DRAFT VERZIJA

DRAFT VERZIJA

EKOLOŠKI MENADŽMENT I UPRAVLJANJE PRIRODNIM RESURSIMA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

KA ZELENOJ TRANZICIJI: LJUDSKI RESURSI KAO NOSIOCI EKOLOŠKIH PROMENA U ORGANIZACIJI

TOWARDS GREEN TRANSITION: HUMAN RESOURCES AS DRIVERS OF ENVIRONMENTAL CHANGES IN THE ORGANIZATION

DANILO VELIČKOV[1], NATAŠA PETROVIĆ[2], JELENA ANDREJA RADAKOVIĆ[3], KATARINA VELIČKOV[4]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, danilo.velickov@fon.bg.ac.rs
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, natasa.petrovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-9576-7102
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, jelenaandreja.radakovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-8771-8215
[4] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, katarina.velickov@fon.bg.ac.rs

Rezime: *Savremene organizacije suočene su sa složenim ekološkim izazovima koji zahtevaju strateški promenu poslovanja ka održivosti. Integrisani ekološki menadžment predstavlja holistički pristup koji prepoznaje međuzavisnost ekoloških sistema i potrebu za sistemskim rešenjima organizacija. Ljudski resursi su ključni nosioci ekoloških promena kroz razvoj njihove ekološke svesti, motivaciju i primenu zelenih HR praksi. Ovaj rad istražuje povezanost integrisanog ekološkog menadžmenta i uloge zaposlenih u sprovođenju ekološki održivih praksi, sa fokusom na ekološki odgovorno ponašanje zaposlenih. Rezultati ankete sprovedene među zaposlenima različitih organizacija i sektora pokazuju njihovu značajnu svest o važnosti ekološke odgovornosti i podrške za razvoj aktivne uloge HR sektora u oblasti ekološke održivosti. U anketi je učestvovalo 115 ispitanika, a rezultati ankete su statistički obrađeni u SPSS softveru 23. Takođe, identifikovan je jaz između prepoznate uloge i stvarnog angažmana HR sektora u ovim praksama. Rezultati ukazuju na potrebu strateškog pristupa HR sektora usmerenog na edukaciju, motivaciju i kreiranje podsticajnog okruženja te usklađenost institucionalnih mera i lične angažovanosti zaposlenih, pri čemu zeleni HR pristupi predstavljaju ključni faktor transformacije ka održivom poslovanju.*

Ključne reči: *integrisani ekološki menadžment, održivost, ljudski resursi, zeleni HR pristupi, ekološka svest, ekološki odgovorno ponašanje zaposlenih, organizaciona kultura, ekološka odgovornost.*

Abstract: *Modern organizations face complex environmental challenges that require a strategic shift towards sustainability. Integrated Environmental Management represents a holistic approach recognizing the interdependence of ecological systems and the need for systemic solutions of organizations. Human resources play a key role as drivers of environmental change through development of their environmental awareness, motivating employees, and implementing green HR practices. This paper explores the connection between integrated environmental management and the role of employees in implementing environmentally sustainable practices, focusing on Green Employee Behavior. The results of a survey conducted among employees from various organizations and sectors revealed significant awareness of environmental responsibility and support for development of an active role of the HR section in the field of environmental sustainability. A total of 115 participants took part in the survey, and the survey findings were analyzed using SPSS software version 23. Also, a gap was identified between the perceived role and the actual engagement of HR in these practices. The results highlight the need for a strategic HR approach focused on education, motivation, and creating a supportive environment, as well as the personal commitment of employees, with green HR practices representing a key factor in the transformation towards sustainable business.*

Keywords: *integrated environmental management, sustainability, human resources, green HR practices, environmental awareness, Green Employee Behavior (GEB), organizational culture, environmental responsibility.*

DRAFT VERZIJA

1. UVOD

"Održivi razvoj je razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti, a da ne ugrožava sposobnost budućih generacija da zadovolje svoje potrebe. U sebi sadrži dva ključna pojma: pojam 'potreba', posebno osnovnih potreba siromašnih u svetu, kojima treba dati prioritet; i ideju ograničenja koje nameću stanje tehnologije i društvene organizacije na sposobnost životne sredine da zadovolji sadašnje i buduće potrebe."
(World Commission on Environment and Development [WCED]), 1987)

„Evidentno je da se kao civilizacija suočavamo sa mnogobrojnim globalnim ekološkim, društvenim i ekonomskim izazovima, dostižući tačku koja preti mogućnošću prelaska već ozbiljno narušenih planetarnih granica" (Veličkov et al., 2023). Kao najalarmantniji javljaju se globalno zagrevanje i klimatske promene koje predstavljaju značajne i rastuće izazove za razvoj društava širom sveta i samu održivost planete (Gupta, 2015; Peduzzi, 2019; Radaković et al., 2025; Thomas, 2017). Ovome treba dodati da je paralelno, porast svetske populacije doveo do porasta neefikasne potrošnje prirodnih resursa (Symth, 2004).

Složeni i međusobno povezani ekološki izazovi, od klimatskih promena i degradacije ekosistema, pa sve do rastuće potrošnje prirodnih resursa, suočava savremene organizacije sa potrebom da redefinišu svoje razvojne i poslovne pravce kako bi odgovorile na ove probleme. Zato se organizacije sve više fokusiraju na zaštitu životne sredine i održivi razvoj (Ahmad et al., 2025). Održivost, kako je još 1987. istaknuto u izveštaju Svetske komisije za životnu sredinu i razvoj, ne podrazumeva odricanje od rasta, već njegovu usmerenu transformaciju u pravcu koji zadovoljava potrebe sadašnjosti, ali na način takav da se ne ugroze mogućnosti budućih generacija (WCED, 1987). Na ovoj definiciji se zasnivaju napori međunarodnih politika, ne samo u odnosu na zaštitu životne sredine, već i u odnosu na globalnu održivost svih društava (Borojevic et al., 2014; Borojević et al., 2017).

Ideja održivosti postepeno postaje ključni okvir strateškog poslovanja organizacije, ne samo u domenu ekološke odgovornosti, već i u razvoju društveno pravednijih i dugoročno održivih modela upravljanja imajući u vidu da su izazovi održivog razvoja univerzalni: ekološki, ekonomski i društveni koji moraju da se posmatraju zajedno i koji važe za sve zemlje i društva (Arora-Jonsson, 2022). U tom smislu, održivi razvoj prestaje da bude tema rezervisana isključivo za deklarativne politike, već postaje centralni deo poslovne prakse, posebno u sektorima koji imaju snažan uticaj na životnu sredinu (Nasrullah, 2011). Ovome bi trebalo dodati da kulturna i politička održivost se takođe smatraju komponentama održivog razvoja (Zicmane, 2004). Dodatno, akcenat se pomera sa tehničkih rešenja na sistemsku promenu unutar organizacija, u kojoj ljudski resursi igraju nezamenljivu ulogu. Kako navode Renwick i saradnici (2013), integracija principa zelenog upravljanja ljudskim resursima omogućava podizanje ekološke kompetentnosti zaposlenih, motivisanje i uključivanje svih članova organizacije u ekološke inicijative, što je presudno za uspešnu implementaciju i održivost ekoloških promena. Tako, HR funkcije postaju pokretači promena, kreirajući uslove za široku participaciju zaposlenih, razvoj zelenih veština i jačanje kulture u kojoj se vrednuju ekološki principi kao temelj poslovanja.

U radu se analizira povezanost integrisanog ekološkog menadžmenta (IEM) i funkcije ljudskih resursa, sa fokusom na ulogu zaposlenih u ostvarivanju održivosti. Polazi se od stava da su zaposleni ključni nosioci promena ka ekološki odgovornom poslovanju, a ne samo izvršioci politika menadžmenta. Istražuju se načini na koje zaposleni doprinose zelenim praksama kroz svakodnevne aktivnosti, inicijative i kulturološku promenu, kao i faktori koji podstiču ili otežavaju njihovo uključivanje u IEM.

2. INTEGRISANI EKOLOŠKI MENADŽMENT

IEM predstavlja pristup upravljanju zaštitom životne sredine koji polazi od razumevanja njene sveobuhvatne, složene i međusobno povezane prirode. Kako ističe Bührs (1995) ovaj koncept zasnovan je na shvatanju da životna sredina ne može biti razdvojena na izolovane oblasti ili segmente, jer je reč o jedinstvenom sistemu u kom je „sve povezano sa svačim". Promene koje se dese u jednom delu sistema mogu imati posledice širom cele strukture, te se upravljanje životnom sredinom mora zasnivati na holističkom, sistemskom pristupu. Upravo taj integrisani pogled omogućava celovito sagledavanje uticaja ljudskih i organizacionih aktivnosti na okruženje i pruža osnovu za strateško delovanje u pravcu održivosti.

IEM se razvijao kao odgovor na ograničenja tradicionalnih pristupa koji su životnu sredinu posmatrali kroz prizmu izdvojenih segmenta, uz zanemarivanje njene međuzavisne i kompleksne prirode. Za razliku od tih modela koji se uglavnom zadržavaju na prepoznavanju problema bez sistemskih rešenja, integrisani pristup teži da obuhvati sve relevantne faktore i uspostavi celovit okvir za održivo upravljanje ekološkim

DRAFT VERSION

izazovima. Bührs (1995) naglašava da različiti akteri razvijaju sopstvene sveobuhvatne pristupe, što neočekivano može dovesti do njihove međusobne neusklađenosti. Ipak, upravo ta raznolikost, prema autoru, otvara prostor za učenje, prepoznavanje tačaka povezivanja i izgradnju fleksibilnijeg i sveobuhvatnijeg pristupa zaštiti životne sredine.

Prema Bornu i Sonzoniju (1995), iako je koncept IEM široko prihvaćen, njegova primena u praksi često nailazi na poteškoće, pre svega zbog nedostatka jedinstvenog shvatanja samog pojma i njegovih ključnih elemenata među stručnjacima i praktičarima. Autori ističu četiri osnovne dimenzije koje čine temelj IEM-a: sveobuhvatnost, koja podrazumeva uključivanje svih relevantnih ekoloških, ekonomskih i društvenih faktora; međusobnu povezanost, gde promene u jednom delu sistema utiču na ceo ekosistem; strateški pristup, fokusiran na dugoročno planiranje i prilagođavanje složenim ekološkim izazovima; kao i koordinativnu dimenziju, koja naglašava važnost saradnje različitih aktera, uključujući institucije, privatni sektor, nevladine organizacije i lokalne zajednice, radi postizanja efikasnijih i održivijih rešenja. Usvajanje ovakvog konceptualnog okvira, kako navode, može doprineti smanjenju nesporazuma oko IEM-a i olakšati njegov prelazak iz teorije u praksu. Autori Born i Sonzogni (1995) i Margerum (1999) u svojim istraživanjima ističu da IEM nije samo tehnički, već i društveno-politički proces koji podstiče saradnju, inkluzivnost i odgovorno korišćenje prirodnih resursa.

Margerum (1999) naglašava da je unapređenje procesa odlučivanja ključna komponenta IEM-a, jer uključivanje javnosti i relevantnih strana doprinosi većoj prihvaćenosti i efikasnosti mera zaštite životne sredine. Otvoren i transparentan proces odlučivanja gradi poverenje i osigurava da predložene mere budu usklađene sa konkretnim ekološkim i društvenim okolnostima, čime se jača njihova dugoročna održivost.

Na osnovu navedenog, zaključak je da IEM predstavlja savremen i neophodan pristup u upravljanju životnom sredinom koji prepoznaje složenost i međuzavisnost ekoloških sistema. Za razliku od tradicionalnih pristupa, IEM teži da sagleda životnu sredinu kao jedinstven i povezan sistem, u kojem promene u jednom segmentu mogu imati široke posledice. Iako primena IEM-a u praksi može nailaziti na prepreke usled različitih interpretacija i nedostatka harmonizacije, upravo ta raznolikost može biti polazna tačka za učenje i razvoj fleksibilnijih i efektivnijih rešenja. Usvajanjem integrisanog koncepta, organizacije i društvo u celini mogu postići dugoročnu održivost, efikasnije upravljanje resursima i bolju zaštitu životne sredine. Stoga je IEM važan temelj za razvoj budućih ekoloških politika i praksi unutar organizacija koje teže skladnijem odnosu između ljudi i prirode.

3. LJUDSKI RESURSI – NOSIOCI ODRŽIVIH PRAKSI

S obzirom na to da su zaposleni i HR sektor oni koji svojim znanjem, stavovima i aktivnostima pokreću i podržavaju ekološke inicijative i promene, ljudski resursi igraju ključnu ulogu u procesu zelene transformacije organizacija. Kroz razvoj ekološke svesti, liderstvo i primenu zelenih HR pristupa, organizacije mogu efikasnije implementirati održive prakse i prevazići izazove na putu ka održivom poslovanju.

Važnu ulogu u formiranju održivih praksi ima ekološko odgovorno ponašanje (eng. *Green Employee Behavior* - GEB). GEB predstavlja skup ekološki odgovornog ponašanja koje zaposleni ispoljavaju na radnom mestu, usklađujući svoje aktivnosti sa ciljevima održivosti organizacije i zaštite životne sredine. GEB obuhvata formalne zadatke definisane radnim ulogama, ali i druge inicijative koje zaposleni preuzimaju dobrovoljno, izvan svojih radnih i utvrđenih dužnosti, a koje doprinose smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu (El-Tony & Choo, 2021). Suština razvoja GEB leži u formiranju, odnosno oblikovanju i negovanju individualnih zelenih vrednosti koje motivišu zaposlene da kontinuirano usvajaju ekološki prihvatljive prakse. Ove vrednosti predstavljaju unutrašnje norme i uverenja koja usmeravaju ponašanje zaposlenih prema očuvanju prirodnih resursa i odgovornom korišćenju energije i materijala. Tako, GEB se smatra ključnim faktorom za ostvarivanje održivih performansi organizacije i podsticanje šire ekološke svesti unutar radne zajednice.

Ones i Dilchert (2012) ističu da ekološki odgovorno ponašanje obuhvata aktivnosti kao što su racionalno korišćenje resursa, podrška zelenim inicijativama i prenošenje ekološke svesti unutar organizacije. Ovakvo ponašanje je značajno jer ne zahteva uvek dodatne resurse ili formalne politike, već se oslanja na unutrašnju motivaciju i lične stavove zaposlenih prema zaštiti životne sredine. Iz tog razloga, autori naglašavaju potrebu da organizacije razvijaju strategije koje podstiču ličnu odgovornost zaposlenih, gradeći etički odnos prema ekologiji kao ključni deo korporativne kulture.

Tang i saradnici (2018) ističu da efikasno uključenje zaposlenih u ekološke aktivnosti kroz vidljive oblike podrške kao što su zelene obuke, formiranje timova (posebno takozvanih „zelenih timova") i komunikacija ekoloških ciljeva, znatno doprinosi povećanju njihove motivacije i proaktivnosti u zaštiti životne sredine. Kada organizacije razvijaju takvo stimulativno okruženje za zaposlene, gde zaposleni osećaju da njihova

ORKIP VERZIJA

ekološka inicijativa ima vrednost i podršku, oni češće pokreću i realizuju zelene inicijative koje dovode do stvarnih promena. Imajući to u vidu, posredno se potvrđuje da ljudski resursi, odnosno zaposleni, njihovi rukovodioci i učestvovanje, predstavljaju ključne nosioce održivih organizacionih promena, odnosno da samo u takvom podsticajnom kontekstu ekološke prakse prelaze iz ideje u stvarnost (Tang et al., 2018).

U okviru Green HRM pristupa, Hameed i saradnici (2020) ističu da su same ekološke prakse u upravljanju ljudskim resursima nedovoljne kako bi zaposleni usvojili održivo ponašanje. Odnosno, da je ključni faktor osnaživanje zaposlenih, stvaranje podsticajnog i podržavajućeg okruženja u kome oni imaju slobodu da predlože i preuzmu inicijative i osećaj lične odgovornosti za ekološke ciljeve. U takvim uslovima zaposleni postaju proaktivni učesnici u sprovođenju zelenih praksi, čime direktno doprinose održivosti organizacije. Njihove lične vrednosti i stavovi prema životnoj sredini dodatno pojačavaju ovaj efekat, čineći ljude centralnim nosiocima ekoloških promena kroz svoju motivaciju, učešće i liderstvo (Hameed et al., 2020).

4. METODOLOGIJA I ANALIZA STAVOVA ZAPOSLENIH O EKOLOŠKOJ ODGOVORNOSTI

Istraživanje prikazano u radu je sprovedeno na osnovu upitnika koji je realizovan online, u okviru završnog rada na specijalističkim akademskim studijama na Fakultetu organizacionih nauka.

Upitnik je dizajniran sa ciljem da prikupi podatke o znanju, stavovima i iskustvima zaposlenih u vezi sa ekološkom odgovornošću i angažmanom sektora ljudskih resursa. Anketa je sadržala različite tipove pitanja, uključujući Likertovu skalu, višestruki izbor i otvoreno pitanje zaposlenima usmereno na njihove preporuke, mišljenja i stavove po ovom pitanju.

Upitnik je sproveden elektronskim putem (preko platforme Google Forms) što je omogućilo pristup širokom spektru ispitanika iz različitih sektora i organizacionih nivoa. Uzorak čine zaposleni iz različitih sektora, bez ograničenja po obrazovanju ili poziciji, radi obezbeđivanja raznovrsnosti podataka. Ceo postupak je sproveden po etičkim principima, uz anonimnost i dobrovoljnost, uz odobrenje Etičkog komiteta Univerziteta u Beogradu - Fakulteta organizacionih nauka.

Podaci prikupljeni istraživanjem obrađeni su primenom deskriptivne statistike radi identifikacije ključnih obrazaca u stavovima i angažovanosti zaposlenih u domenu ekološke odgovornosti, dok dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za dalje analize i formulisanje preporuka za unapređenje uloge ljudskih resursa u implementaciji održivih praksi unutar organizacija.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Upitnik je popunilo ukupno 115 ispitanika, prosečne starosti od 36,68 godina. Među njima je bilo 66 ženskih ispitanika – 57,4%, dok je broj muških ispitanika muškaraca bio nešto manji – 49, odnosno 42,6%.

Kada su ispitanici pitani koliko su upoznati sa konceptom IEM, više od polovine ispitanika (51,3%) navelo je da su delimično upoznati s pojmom, dok je skoro četvrtina (23,5%) izjavila da nije upoznata. Samo 9,6% ispitanika reklo je da potpuno razume koncept, dok ih je isto toliko navelo da uopšte ne poseduje nikakvo predznanje o ovom konceptu. Ovi rezultati ukazuju na to da je IEM i dalje nedovoljno poznat među zaposlenima, što može ograničiti njihovo aktivno učešće u ekološkim inicijativama. U tom kontekstu, ističe se važna uloga HR sektora u edukaciji i širenju svesti o ovom konceptu kao delu šire strategije održivog poslovanja.

Istovremeno, većina ispitanika smatra da je primena IEM važna za dugoročni uspeh organizacije (čak 52,2% navodi da je značajna, dok 21,7% ocenjuje da je veoma značajna). Ovi rezultati ukazuju na rastuću svest o tome da održivost nije samo etički izbor, već i strateški preduslov savremenog poslovanja. Iako postoji i deo ispitanika koji koncept ne prepoznaje kao posebno važan, dominacija pozitivnih stavova potvrđuje potencijal za dalji razvoj i implementaciju ekoloških politika, naročito uz podršku zaposlenih i efikasnu internu edukaciju.

Rezultati takođe pokazuju da postoji jaka podrška zaposlenih aktivnoj ulozi HR sektora u promovisanju ekoloških vrednosti i praksi – čak 85,2% ispitanika se slaže ili potpuno slaže s tom tvrdnjom. Istovremeno, svega troje ispitanika (2,6%) izrazilo je neslaganje, što ukazuje na gotovo zanemarljiv nivo otpora prema ovoj ideji. Ovakvi nalazi jasno potvrđuju da se HR sektor percipira kao ključan akter u procesu izgradnje ekološki odgovornih organizacija.

Rezultati pokazuju da većina ispitanika značajno podržava ideju da ekološka obuka postane deo standardnih HR programa (preko 80% ispitanika se u potpunosti ili uglavnom slaže sa tom tvrdnjom, dok je neslaganje gotovo zanemarljivo). Međutim, kada je reč o konkretnom učešću u ekološkim inicijativama koje sprovodi HR sektor, više od 60% ispitanika navodi nizak ili nikakav nivo uključenosti. Ovo ukazuje na jaz između prepoznate uloge HR sektora i njegove stvarne, realne aktivnosti u praksi. Upravo zbog toga,

DRAFT VERZIJA

zaključak je da je važno da se unutar organizacija razvije jasna strategija HR sektora za sprovođenje zelenih programa, da se zaposleni bolje informišu i motivišu, kako bi se ekološka svest pretvorila u konkretne akcije i deo svakodnevne poslovne kulture.

Rezultati istraživanja pokazuju da zaposleni najviše vrednuju konkretne i praktične aktivnosti HR sektora koje doprinose održivom razvoju. Najveći broj ispitanika (60,9%) istakao je značaj organizovanja obuka i radionica na temu zaštite životne sredine, što ukazuje na izraženu potrebu za edukacijom i podizanjem svesti. Sledeća po važnosti je podrška ekološkim inicijativama zaposlenih (53,9%), kao i učešće HR sektora u kreiranju sistema nagrađivanja za odgovorno ponašanje (47,8%). Značajan broj ispitanika (40,9%) podržava i mere kao što su podsticanje korišćenja zelenog prevoza i rada od kuće. Sa druge strane, najmanje ispitanika (14,8%) odabralo je uključivanje ekoloških vrednosti u selekciju kandidata, što ukazuje da ovu meru vide kao kompleksniju i težu za sprovođenje. Ovi podaci ukazuju da zaposleni prepoznaju HR sektor kao ključnog aktera u sprovođenju praktičnih i motivišućih zelenih inicijativa, uz otvorenost za šire promene u kadrovskoj politici. Ispitanici ukazuju da ekološka pitanja moraju biti deo strateške orijentacije svake organizacije, bez obzira da li je javna ili privatna. Posebno se naglašava da „zelena tranzicija“ ne sme ostati na deklarativnom nivou, već mora uključiti konkretne mere: uvođenje zelenih kriterijuma u selekciju i razvoj zaposlenih, edukaciju o reciklaži, energetskoj efikasnosti i formiranje „zelenih timova“ u organizaciji. Iz iznetih stavova ispitanika, jasno je da su ljudski resursi ključan segment ekološke transformacije, najpre u ulozi inicijatora, a zatim kao realizatora i „čuvara“ održivih praksi.

6. ZAKLJUČAK

S obzirom na izraženu svest zaposlenih o značaju ekološke odgovornosti, ali i na uočeno neslaganje između deklarativnih stavova i stvarnog angažmana, postaje jasno da je ključ za uspešnu „zelenu tranziciju“ upravo u snažnijoj ulozi HR sektora kao inicijatora i koordinatora promena unutar organizacije. Ljudi koji se bave upravljanjem ljudskim resursima imaju jedinstvenu poziciju da oblikuju organizacionu kulturu i svakodnevne prakse kroz koje se ekološke vrednosti ne samo usvajaju, već i aktivno praktikuju. Njihova odgovornost prevazilazi administrativne zadatke i postaje strateški izazov koji zahteva sistematski pristup u motivisanju, edukaciji i nagrađivanju zaposlenih. Roscoe i saradnici (2019) ističu da HR sektor ima ključnu ulogu u oblikovanju „zelene“ organizacione kulture, istovremeno obraćajući pažnju na vrednosti, uverenja i ponašanja zaposlenih kroz proces zapošljavanja, obuke, ocenjivanja i nagrađivanja.

Nedostatak jasne institucionalne podrške, nedovoljna komunikacija ciljeva održivosti i ograničeni resursi za interne ekološke programe ukazuju na to da je neophodno uspostaviti usklađenu strategiju između top menadžmenta i HR sektora. Takva saradnja treba da obezbedi ne samo formalno usvajanje zelenih politika, već i njihovu praktičnu realizaciju kroz svakodnevne aktivnosti i angažovanje zaposlenih na svim nivoima. Tako, transformaciono liderstvo u kombinaciji sa motivacijom zaposlenih značajno doprinosi razvoju pro-ekološkog ponašanja u organizaciji, ukazujući da liderstvo usmereno ka održivosti predstavlja ključni pokretač organizacione transformacije i aktivnog učešća zaposlenih u ekološkim inicijativama (Sarkis et al., 2013). Kada HR sektor dobije jasne smernice i adekvatne kapacitete, može efikasnije da osnaži zaposlene da postanu aktivni nosioci ekoloških promena, što će doprineti dugoročnoj održivosti organizacije.

Dalje, implementacija zelenih kriterijuma u ključne HR procese – od selekcije kandidata preko programa obuke i razvoja, do sistema ocenjivanja i nagrađivanja – predstavlja način da se održivost trajno integriše u organizacione vrednosti i prakse. Na ovaj način, zeleni principi postaju deo svakodnevnih radnih zadataka i individualnih odgovornosti, a ne samo deklarativni ciljevi. Takođe, podsticanje i podrška inicijativama zaposlenih unutar „zelene“ kulture jačaju osećaj zajedništva i lične uključenosti, što je od suštinskog značaja za uspešnu ekološku transformaciju.

Zaključno, ljudski resursi nisu samo podrška procesu već njegov glavni pokretač, koji povezuje institucionalne ciljeve sa svakodnevnim ponašanjem zaposlenih. Stvaranjem sinergije između liderstva, HR sektora i zaposlenih, organizacije mogu da izgrade održivu budućnost u kojoj ekološke promene nisu samo neophodnost, već i strateška prednost.

LITERATURA

Ahmad, S., Javed, U., Sharma, C., & Siddiqui, M. S. (2025). Green human resource management: Analyzing sustainable practices and organizational impact through a Word2Vec approach. *Green Technologies and Sustainability*, 100224. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100224

Arora-Jonsson, S. (2022). The sustainable development goals: A universalist promise for the future. *Futures*, *146*, 103087. https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103087

Born, S.M., Sonzogni, W.C. (1995). Integrated environmental management: strengthening the conceptualization. *Environmental Management, 19*, 167–181. https://doi.org/10.1007/BF02471988

Borojevic, T., Petrovic, N. B., & Vuk, D. (2014, September). Youth and Environmental Education for Sustainable Development. *IJSR.NET, 3*(9), 57-62.

Borojević, T., Maletič, M., Petrović, N., Radaković, J. A., Senegačnik, M., & Maletič, D. (2017). Youth attitudes towards goals of a new sustainable development agenda. *Problemy Ekorozwoju, 12*(2), 161-172.

El-Tony, Y., & Choo, L. (2021, November 15). Cultivating employee green behavior: The essence of individual green value. Third International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change, Sakheer, Bahrain, 2021, pp. 334-338. https://doi.org/10.1109/IEEECONF53624.2021.9668046

Gupta, S. D. (2015). Dirty and Clean Technologies. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, *47*(1), 123–145. https://doi.org/10.1017/aae.2014.1

Hameed, Z., Yusoff, R. Z., & Hardi, P. (2020). Do green HRM practices influence employees' environmental performance? *Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 27*(6), 2739–2751. https://doi.org/10.1002/csr.1957

Margerum, R. (1999). Integrated Environmental Management: The Foundations for Successful Practice. *Environmental Management 24*, 151–166. https://doi.org/10.1007/s002679900223

Nasrullah, N. M. (2011). Business and Sustainable Development: The role of CSR as a Catalyst. *Transnational Corporation Review*, *3*(3), 96–105. https://doi.org/10.1080/19186444.2011.11658300

Ones, D. S., & Dilchert, S. (2012). Environmental sustainability at work: A call to action. *Industrial and Organizational Psychology, 5*(4), 444–466. https://doi.org/10.1111/j.1754-9434.2012.01478.x

Peduzzi, P. (2019). The Disaster Risk, Global Change, and Sustainability Nexus. *Sustainability*, *11*(4), 957. https://doi.org/10.3390/su11040957

Radaković, J. A., Makajić-Nikolić, D., & Nikolić, N. (2025). Bridging the Gap: A Novel Approach to Flood Risk Assessment for Resilience. *Water*, *17*(13), 1848. https://doi.org/10.3390/w17131848

Renwick, D. W. S., Redman, T., & Maguire, S. (2013). Green human resource management: A review and research agenda. *International Journal of Management Reviews, 15*(1), 1–14. https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2011.00328.x

Roscoe, S., Subramanian, N., Jabbour, C. J. C., & Chong, T. (2019). Green human resource management and the enablers of green organisational culture: Enhancing a firm's environmental performance for sustainable development. *Business Strategy and the Environment, 28*(5), 737–749. https://doi.org/10.1002/bse.2277

Sarkis, J., Graves, L., & Zhu, Q. (2013). How transformational leadership and employee motivation combine to predict employee proenvironmental behaviors in China. *Journal of Environmental Psychology, 35*, 81–91. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2013.05.002

Symth, J. (2004). Environment and education: A view of a changing scene. *Environmental Education Research, 12*(4), 247-264. https://doi.org/10.1080/13504620600942642

Tang, G., Chen, Y., Jiang, Y., Paillé, P., & Jia, J. (2018). Green human resource management practices: Scale development and validity. *Asia Pacific Journal of Human Resources, 56*(1), 31–55. https://doi.org/10.1111/1744-7941.12147

Thomas, V. (2017). Climate Change and Natural Disasters: Transforming Economies and Policies for a Sustainable Future. Routledge.

Veličkov, D., Radaković, J. A., & Velemir, K. (2023). Prema zelenoj promeni: Rodna ravnopravnost nije samo igra brojeva [Towards the green shift: Gender equality isn't just a numbers game]. U Petrović, N., Ćirović, M. (Eds.) Zbornik radova XIV skupa privrednika i naučnika – SPIN'23: Digitalni i zeleni razvoj (str. 268–276). Univerzitet u Beogradu – Fakultet organizacionih nauka

World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). Our common future. Oxford University Press. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf

Zicmane, E. (2004). Impact of ICT on sustainable development. European Commission. http://www. ami-communities. eu.

DRAFT VERSION

EKONOMSKI MODELI I EKONOMETRIJA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

UPOREDNA ANALIZA POSLOVNIH CIKLUSA PRIMENOM HP I HAMILTONOVOG FILTERA
COMPARATIVE ANALYSIS OF BUSINESS CYCLES USING THE HP AND THE HAMILTON FILTER

JOVANA MILEUSNIC[1], ZORICA MLADENOVIC[2]

[1] Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Beograd, jovana.mileusnic@ekof.bg.ac.rs, 0009-0007-4212-4035
[2] Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Beograd, zorica.mladenovic@ekof.bg.ac.rs, 0000-0003-1579-4205

Rezime: *U radu su analizirane performanse Hodrik-Preskotovog (HP) i Hamiltonovog filtera pri dekompoziciji vremenskih serija na trend i cikličnu komponentu, koristeći mesečne podatke indeksa industrijske proizvodnje za zemlje Centralne i Istočne Evrope u periodu 2000–2025. Rezultati pokazuju da ciklusi dobijeni Hamiltonovim filterom ispoljavaju veću perzistentnost i viši stepen usklađenosti ciklusa među posmatranim zemljama. Međutim, nalazi ne potvrđuju da je ovaj filter robusniji na promenu ulaznih parametara i na ocenjivanje u realnom vremenu, što bi trebalo da je njegova ključna metodološka prednost u odnosu na HP filter (Hamilton (2018)). Naše istraživanje može da doprinese boljem razumevanju novijih pristupa u analizi poslovnih ciklusa i da ukaže na pojedine metodološke izazove u formiranju izvedenih serija.*

Ključne reči: *Hamiltonov filter, HP filter, poslovni ciklusi.*

Abstract: *This paper examines the performance of the Hodrick-Prescott (HP) filter and the Hamilton filter in decomposing time series into trend and cyclical components, using monthly industrial production index data for selected Central and Eastern European countries from 2000 to 2025. The findings suggest that the cycles extracted using the Hamilton filter exhibit greater persistence and a higher degree of cross-country coherence. However, the analysis does not provide strong evidence of superior robustness of the Hamilton approach under variations in input parameters or in real-time estimation, despite claims that Hamilton filter "achieves all the objectives sought by users of the HP filter with none of its drawbacks" (Hamilton (2018)). Our study aims to enhance understanding of modern filtering techniques in business cycle analysis while highlighting some methodological challenges that researchers should consider when extracting time series components.*

Keywords: *Hamilton filter, HP filter, business cycles.*

1. UVOD

Primena metoda dekompozicije prethodno desezonirane vremenske serije na trend i cikličnu komponentu često predstavlja prvi korak ekonometrijske analize. Cilj je uklanjanje kratkoročnih oscilacija kako bi se izdvojila dugoročna komponenta kretanja. Ona se vizuelno javlja u obliku izravnate („izglačane") serije. Međutim, rutinsko korišćenje ovih metoda često podrazumeva nepoznavanje, kako metodoloških ograničenja, tako i načina na koji se tretiraju pojedine komponente. To može dovesti do proizvoljnosti u ekonomskom tumačenju izvedenih serija.

Ciklična komponenta vremenske serije koja meri privrednu aktivnost se uzima za aproksimaciju proizvodnog jaza, a trend za potencijalni nivo proizvodnje. Prema Lucas (1995), izvedena serija ciklične komponente služi za opisivanje poslovnih ciklusa. U jednom od svojih govora, bivši član Odbora guvernera Federalnih rezervi, Miškin, ukazao je na složenost pouzdane ocene potencijalnog autputa, koji je relevantan za razumevanje da li ekonomija funkcioniše iznad ili ispod svog održivog kapaciteta[1], što opisuje kao ključni problem sa kojim se susreću kreatori ekonomskih politika u centralnim bankama.

Postupak izdvajanja dugoročne komponente privrednog rasta ima primenu u analizi i tumačenju realne i inflacione neizvesnosti (Serletis & Liu (2022), Mileusnic (2025)). Brojna istraživanja koja se bave uticajem inflacione (nominalne) i proizvodne (realne) neizvesnosti na makroekonomske pokazatelje do danas nisu dovela do jedinstvenih zaključaka, ni na teorijskom, ni na empirijskom nivou. Posmatranjem dinamičke strukture

[1] https://www.federalreserve.gov/newsevents/speech/mishkin20070524a.htm

DRAFT VERZIJA

unakrsnih korelacija između proizvodnog jaza i relevantnih makroekonomskih varijabli moguće je identifikovati da li one vode, prate ili zaostaju u odnosu na ciklične fluktuacije. Takva analiza pruža uvid u njihovu međusobnu dinamiku i može biti dobra polazna osnova za dalje modeliranje efekata realne i nominalne neizvesnosti.

Hamiltonov filter (Hamilton (2018)) je promovisan kao superiornije rešenje u odnosu na do tada intenzivno korišćen HP filter (Hodrick & Prescott (1997)). Kao nedostatke HP filtera, rad ističe njegovu sklonost ka stvaranju prividnih ciklusa, jer teži da oceni glatku funkciju trenda, što dalje implicira osetljivost rezultata pri promeni vrednosti parametra izravnavanja (Bank (2000), Franke et al. (2022), Franke et al. (2025)). Takođe, kao dvostrani filter, koristi prošle, sadašnje i buduće vrednosti za ocenu trenda, te postaje neprecizan na krajevima uzorka usled malog broja podataka (engl. *end-of-sample bias*). Ovo rezultira lošim svojstvima pri ocenjivanju u realnom vremenu, posebno u prisustvu strukturnih lomova (Orphanides & van Norden (2002), Jönsson (2020b)). Sa druge strane, ocenjeni trend iz Hamiltonovog filtera najčešće karakteriše visoka volatilnost, što nije u skladu sa ustaljenim stavom da je dugoročni trend u razvijenim privredama relativno stabilan, budući da je određen strukturnim, tačnije demografskim i tehnološkim, faktorima koji se menjaju sporije (Franke et al. (2025)).

U ovom radu analiziraćemo performanse HP i Hamiltonovog filtera na osnovu mesečnog indeksa industrijske proizvodnje zemalja Centralne i Istočne Evrope u periodu 2000–2025. Naše modeliranje uzima u obzir sledeća tri aspekta: (1) uporedna analiza ocenjenog trenda i ciklične komponente, uz oslonac na standardne definicije ovih pojmova u literaturi; (2) ispitivanje osetljivosti ciklične komponente na promene parametara u oba pristupa uvažavajući predložene modifikacije koje su iznete u radovima Ravn & Uhlig (2002) i Quast & Wolters (2022) za HP i Hamiltonov filter respektivno; (3) upoređivanje ocenjenih cikličnih komponenti u zavisnosti od toga da li se dekompozicija vrši na celokupnom uzorku ili u realnom vremenu. Istraživanje je empirijskog karaktera, pa je određeno izborom konkretne vremenske serije. Budući da stvarne vrednosti potencijalnog autputa i proizvodnog jaza nisu poznate, komparativna analiza svojstava dva filtera može se posmatrati samo u kontekstu sagledavanja dinamike industrijske proizvodnje odabranog skupa zemalja (Yves S Schüler (2021)).

Struktura rada je sledeća. Kratak opis metodologije izložen je u delu 2. Podaci i empirijski rezultati su izneti u delu 3. Deo 4 donosi zaključne komentare, ideje i predloge za buduća istraživanja.

2. KRATAK OPIS METODOLOGIJE

Izdvajanje komponente trenda primenom HP filtera zasniva se na rešavanju problema minimizacije oblika:

$$\min_{\tau}\left(\sum_{t=1}^{T}(y_t-\tau_t)^2+\lambda\sum_{t=2}^{T-1}\left[(\tau_{t+1}-\tau_t)-(\tau_t-\tau_{t-1})\right]^2\right),\ \lambda>0, t=1,\ldots,T \tag{1}$$

gde je: y_t desezonirana vremenska serija od interesa, τ_t komponenta trenda koja se ocenjuje i λ parametar izravnanja. Postoji jedinstveno rešenje za τ_t koje ispunjava navedeni uslov. Preporučena vrednost parametra izravnanja definisana je u radu Hodrick & Prescott (1997), prema prethodno usvojenim pretpostavkama o volatilnosti trenda i ciklične komponente tipičnih makroekonomskih serija, na sledeći način: $\lambda = 14,400$ ($\lambda = 1,600$) za mesečne (kvartalne) podatke. U radu Ravn & Uhlig (2002) predložene su nešto više vrednosti parametra λ, tačnije $\lambda = 129,600$ u slučaju analize mesečnih podataka, čime komponenta trenda postaje "uglačanija", a varijacije u cikličnoj komponenti izraženije.

Dekompozicija zasnovana na Hamiltonovom filteru koristi regresioni pristup. Na primer, za nestacionarnu vremensku seriju filter polazi od autoregresionog modela četvrtog reda, prema kojem se prognozira nivo vremenske serije za horizont predviđanja h:

$$y_{t+h} = \beta_0 + \beta_1 y_t + \beta_2 y_{t-1} + \beta_3 y_{t-2} + \beta_4 y_{t-3} + v_{t+h} \tag{2}$$

U tom slučaju, trend komponenta definisana je kao prognozirana vrednost za: $\mathbf{E}(y_{t+h} \mid y_t, y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3})$, a ciklična komponenta, v_{t+h}, kao serija reziduala oblika $\hat{v}_{t+h|T} = y_{t+h} - \hat{\beta}_{0|T} - \hat{\beta}_{1|T} y_t + \hat{\beta}_{2|T} y_{t-1} - \hat{\beta}_{3|T} y_{t-2} - \hat{\beta}_{4|T} y_{t-3}$ (Serletis & Liu (2022)). Ciklična komponenta je stacionarna, ukoliko početka vremenska serija ima maksimalno četiri jedinična korena. Preporuka za vrednost horizonta predviđanja h zavisi od učestalosti podataka (8 kod kvartalnih i 24 kod mesečnih). Međutim, Quast & Wolters (2022) sugerišu da analiza ne treba da se zasniva isključivo na jednom horizontu predviđanja, već da bi bilo bolje koristiti prosečnu grešku predviđanja, koja u slučaju kvartalnih podataka obuhvata horizonte od četiri do dvanaest. Ova sugestija u literaturi je poznata kao modifikacija Hamiltonovog filtera. Njenom primenom se postiže ravnomernije uključivanje poslovnih ciklusa različitog inteziteta i trajanja.

Postoji više radova koji ukazuju na nedostatke Hamiltonovog filtera. Konkretno, ovaj pristup ima tendenciju da naglasi duge poslovne cikluse, dok istovremeno zanemaruje kratkoročne oscilacije u privrednoj aktivnosti

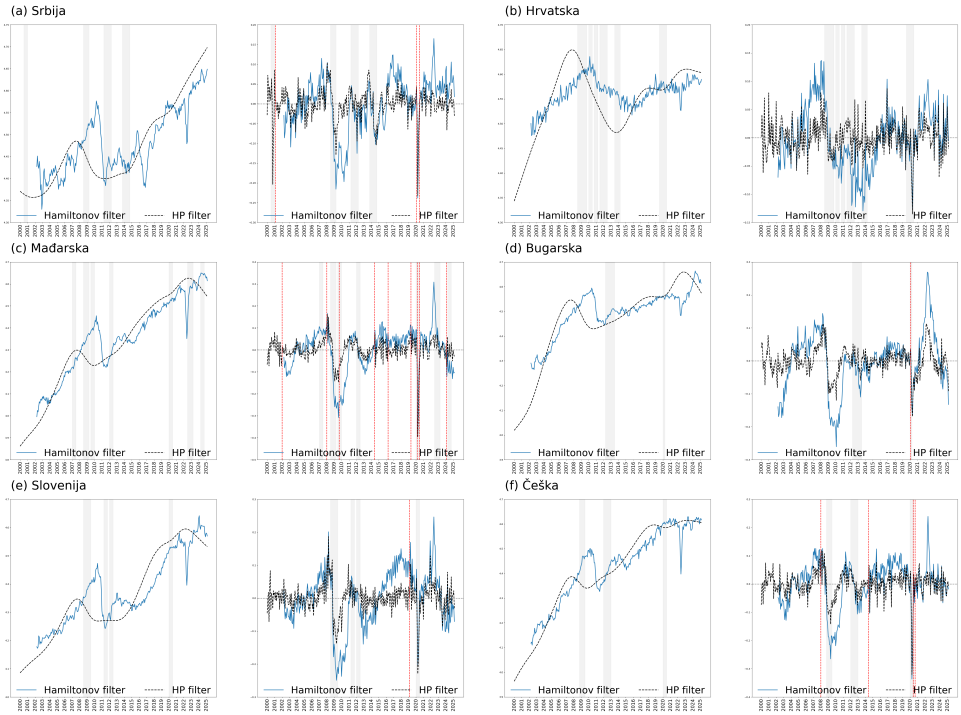
DRAFT VERSION

(Yves S. Schüler (2018), Quast & Wolters (2022)). Kroz Monte Karlo simulacije pokazano je da Hamiltonov filter identifikuje cikličnu komponentu čak i u generisanim vremenskim serijama koje ne sadrže ciklična kretanja (Jönsson (2020a)). Dodatno, izbor parametra h, kao i reda autoregresionog modela deluje prilično proizvoljno, slično problemu subjektivnosti u izboru parametra λ kod HP filtera (Yves S. Schüler (2018)).

3. REZULTATI EMPIRIJSKOG ISTRAŽIVANJA

Posmatramo podatke o indeksu industrijske proizvodnje na mesečnom nivou za izabrane zemlje Centralne i Istočne Evrope (Srbiju, Hrvatsku, Mađarsku, Sloveniju, Bugarsku i Češku) u vremenskom intervalu od januara 2000. godine do marta 2025. godine. Podaci su preuzeti iz baze Bečkog instituta za međunarodne ekonomske studije (https://www.wiiw.ac.at/). Pored Srbije, fokusirali smo se na zemlje Centralne i Istočne koje su ujedno i članice Evropske unije. Podaci su desezonirani korišćenjem X11 metode u softveru RATS. Hamiltonov i HP filter primenjeni su na logaritmovane i desezonirane podatke indeksa industrijske proizvodnje. Opisana transformacija prati standardan pristup u makroekonomskim istraživanjima, uključujući radove Kydland, Prescott, et al. (1990), Serletis & Liu (2022). Dalja analiza je sprovedena paralelno u statističkom paketu EViews i programskom jeziku Python.

Ocenjene trend i ciklične komponente dobijene primenom prethodno opisanih metoda filtriranja prikazane su na Slici 1:. Na ovoj, kao i na narednim slikama, osenčeni su periodi recesije. Dodatno, ucrtane su i vertikalne linije koje označavaju strukturne lomove u kretanju varijanse stope rasta industrijske proizvodnje, identifikovane uz pomoć testa Inclán & Tiao (1994). Test polazi od pretpostavke da je serija stacionarna oko jedinstvene srednje vrednosti, dok varijansa može varirati unutar različitih poduzoraka, što je prikladnija pretpostavka za seriju u prvoj diferenci nego u nivou.



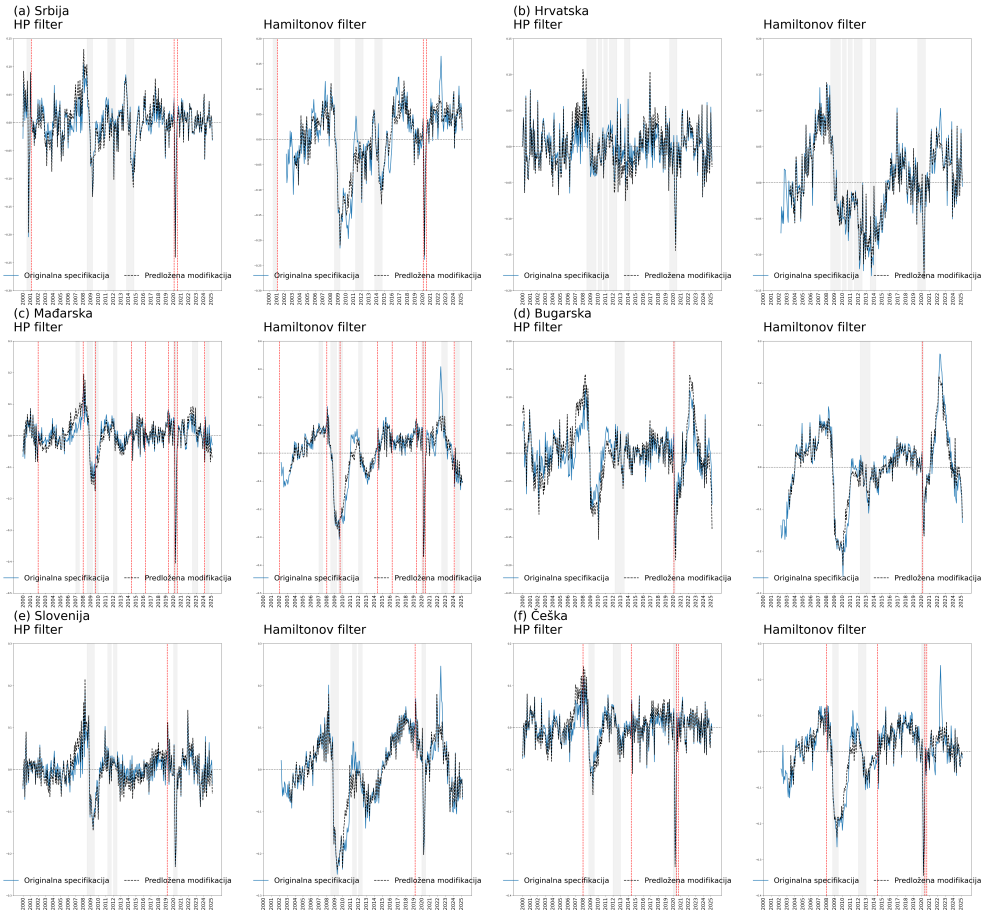
Slika 1: Uporedna analiza trend i ciklične komponente ocenjene HP i Hamiltonovim filterom za izabrane zemlje Centralne i Istočne Evrope

Izvor: Kalkulacija autora

Napomena: Levi grafikon prikazuje kretanje trend komponente ocenjene HP i Hamiltonovim filterom, dok desni grafikonon omogućava uporednu analizu ocenjene ciklične komponente.

Specifičnosti svake od metoda, prethodno sagledane sa teorijskog aspekta, potvrđuju se i našim empirijskim rezultatima. Naime, trend komponenta dobijena Hamiltonovim filterom pokazuje znatno veću volatilnost, što otvara pitanje njene interpretacije, naročito u kontekstu razvijenih ekonomija Quast & Wolters (2022). Dalje, prelomne tačke u kretanju cikličnih komponenti identifikuju se u sličnim vremenskim trenucima kod obe

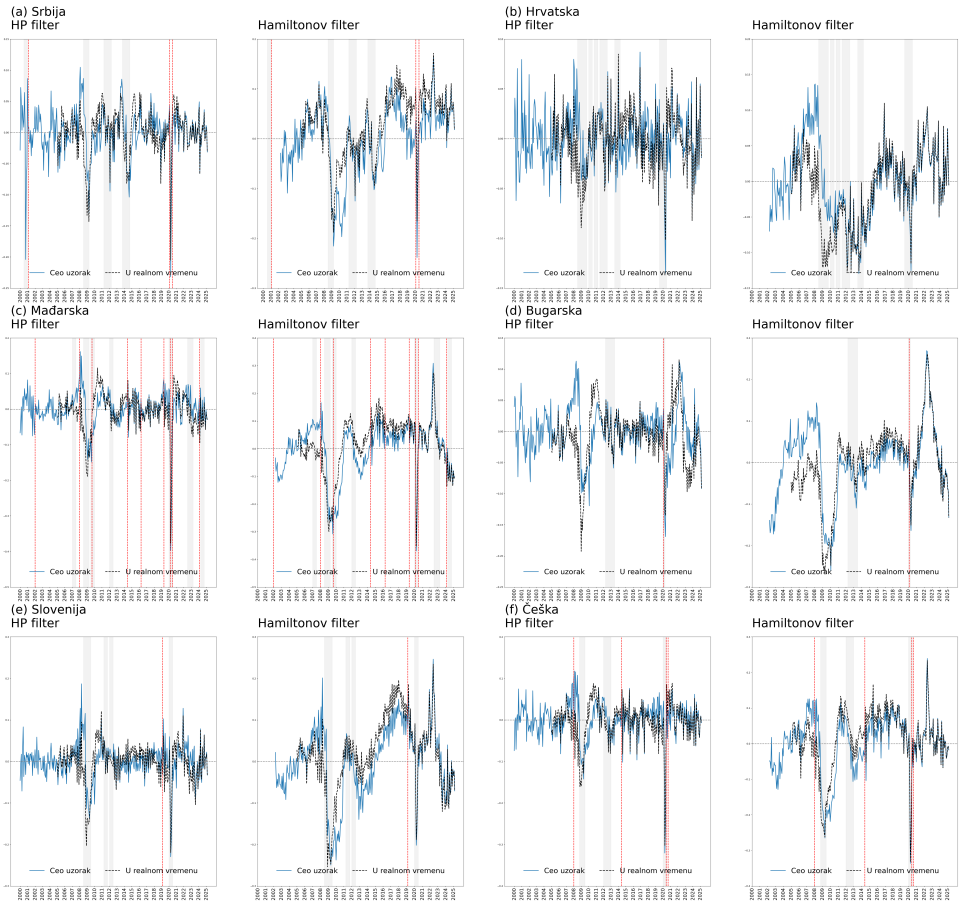
metode, pri čemu Hamiltonov filter pokazuje izraženije intenzitete pada i rasta ekonomske aktivnosti. Tačnije, izvedena serija ciklične komponente ovom metodom pokazuje izraženiju perzistentnost i jasnije poslovne cikluse, što je posebno primetno kod Hrvatske i Slovenije. Konkretno u slučaju Hrvatske, autokorelacioni koeficijent prvog reda je 0.77 za Hamiltonov filter i svega 0.14 za HP filtera (što u pojedinim segmentima uzorka cikličnu komponentu približava karakteristikama belog šuma). Imajući u vidu da se analiza sprovodi na jedinstvenom vremenskom horizontu i u okviru grupe zemalja Centralne i Istočne Evrope koje dele slične društvene, institucionalne i istorijske karakteristike, očekuje se viši stepen usklađenosti poslovnih ciklusa. Ova usklađenost se potvrđuje višim nivoom međusobne korelacije ciklusa dobijenih primenom Hamiltonovog filtera. Takođe, dugi recesioni period u Hrvatskoj koji je trajao sve do 2015. godine uočljiviji je i bolje opisan na osnovu Hamiltonovog filtera. Ipak, postavlja se pitanje da li su dugi poslovni ciklusi prenaglašeni, na šta nam ukazuju prethodni radovi (Yves S. Schüler (2018)).



Slika 2: Promene izvedene serije ciklične komponente u slučaju izmene ulaznih parametara prema predlozima datim u radovima Ravn & Uhlig (2002) i Quast & Wolters (2022)

Proveravamo prvo robusnost dobijenih rezultata vodeći računa o nedostacima HP filtera (prema radu Hamilton (2018)) i predlogu za modifikaciju Hamiltonovog filtera (prema radu Quast & Wolters (2022)). Konkretno, na Slici 2: prikazane su izvedene serije dobijene promenom ulaznih parametara. Budući da i Hamiltonov filter podrazumeva postojanje *ad hoc* parametara, horizonta predviđanja i reda autoregresionog modela (Yves S Schüler (2021)), analiziramo da li i varijacije ovih parametara utiču na rezultate u skladu sa korekcijama predloženim u radu Quast & Wolters (2022). Dobijeni nalazi ukazuju na relativno stabilne rezultate prilikom promene ulaznih parametara za oba filtera, pri čemu prilagođene modifikacije efikasno rešavaju identifikovane probleme za svaki od metoda. U slučaju HP filtera, povećanje vrednosti parametra λ dovodi do izraženijih poslovnih ciklusa, dok nas modifikovani Hamiltonov filter vodi ka cikličnoj komponenti sa manje varijacija. Ipak, ne postoji dovoljno osnova za tvrdnju da promene ulaznih parametara sistematski i

značajnije utiču na rezultate u odnosu na ocene dobijene uz originalnu specifikaciju bilo kog od posmatranih filtera.



Slika 3: Ocena ciklične komponente u realnom vremenu i na osnovu celog uzorka adresirajući problem nepreciznosti na početku i kraju uzorka

U završnom delu ispitujemo stav da HP filter pokazuje slabije performanse prilikom ocenjivanja u realnom vremenu, jer se, kao dvostrani filter, oslanja na informacije iz prošlih, sadašnjih i budućih perioda. Rezultati prikazani na Slici 3: odnose se na analizu kojom se prvih pet godina tretira kao period inicijalne kalibracije, da bi se potom ocene izvodile rekurzivno na bazi proširivanja vremenskog prozora za po jedan period (engl. *quasi-real-time gap*). Nalazi ukazuju da Hamiltonov filter ispoljava izraženija odstupanja na početku uzorka, što je u skladu sa problemom pristrasnosti malih uzoraka (Yves S. Schüler (2018)), ali da se ta odstupanja vremenom značajno smanjuju i postaju gotovo zanemarljiva. Sa druge strane, kod HP filtera su odstupanja u proseku manja, mada ostaju prisutna duž čitavog uzorka. To važi i za krajeve uzorka, čak i kada se vremenski horizont gotovo poklapa sa celim uzorkom. Primetno je da su za oba filtera odstupanja izraženija u trenucima ekstremnih vrednosti (što može biti posledica samog metoda ocenjivanja). Pri tome, ovo svojstvo je posebno prisutno kod HP filtera, čime se dodatno potvrđuju nalazi prethodnih istraživanja (Siemers (2025), Jönsson (2020b)).

4. ZAKLJUČAK

Na uzorku zemalja Centralne i Istočne Evrope, u periodu od januara 2000. do marta 2025. godine, uporedili smo performanse Hodrik-Preskotovog i Hamiltonovog filtera dekompozicije vremenskih serija industrijske proizvodnje. Kako se proizvodni jaz često koristi kao aproksimacija poslovnog ciklusa, ova analiza proverava koji od filtera preciznije oslikava dinamiku ekonomske aktivnosti.

Rezultati ukazuju na visok stepen preklapanja cikličnih komponenti dobijenih primenom oba pristupa, kao i njihovo precizno prepoznavanje perioda recesije. Odsustvo stvarnih, referentnih vrednosti, čak i *ex post*, otežava evaluaciju njihove tačnosti. Ukoliko je cilj istraživanja preliminarna obrada podataka uz primenu jednostavnijih metoda, onda Hamiltonov filter deluje informativnije i konzistentnije u prikazu poslovnih ciklusa. Ipak, potrebno je oprezno pristupiti interpretaciji rezultata, budući da Hamiltonov filter pokazuje tendenciju ka prenaglašavanju cikličnih kretanja. Otuda bi primena modifikovanog Hamiltonovog filtera mogla predstavljati metodološki uravnoteženiji pristup. Međutim, u okviru našeg uzorka identifikovana odstupanja nisu bila od većeg empirijskog značaja. Ističe se i viši nivo usklađenosti poslovnih ciklusa među zemljama za koje postoji pretpostavka o strukturnim sličnostima, kao i tačniji opis dubokih recesija, poput one u Hrvatskoj.

Naša analiza ne potvrđuje veću robusnost Hamiltonovog filtera pri promeni ulaznih parametara ili u realnom vremenu. To su, prema literaturi, osnovne slabosti HP filtera koje bi primenom Hamiltonovog metoda trebalo da budu otklonjene. Ako su pomenute kritike svojstava HP filtera zaista validne, onda su neophodna dodatna istraživanja mehanizama za njihovu korekciju. Pritom, potrebno je razmotriti da li određeni filter doslednije reflektuje poslovne cikluse u zavisnosti od karakteristika posmatrane ekonomije i(ili) specifičnosti analiziranog vremenskog perioda.

LITERATURA

Bank, E. C. (2000). Potential output growth and output gaps: concept, uses and estimates. *Monthly Bulletin*, 37–48.

Franke, R., Kukacka, J., & Sacht, S. (2022). Reconsidering Hodrick-Prescott detrending and its smoothing parameter: Extended version, Working paper. *Available at SSRN*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4147280

Franke, R., Kukacka, J., & Sacht, S. (2025). Is the Hamilton regression filter really superior to Hodrick–Prescott detrending? *Macroeconomic Dynamics*, *29*. https://doi.org/10.1017/S136510052400018X

Hamilton, J. D. (2018). Why you should never use the Hodrick-Prescott filter. *Review of Economics and Statistics*, *100*(5), 831–843. https://doi.org/10.1162/rest_a_00706

Hodrick, R. J., & Prescott, E. C. (1997). Postwar US business cycles: an empirical investigation. *Journal of Money, credit, and Banking*, 1–16. https://doi.org/10.2307/2953682

Inclán, C., & Tiao, G. C. (1994). Use of Cumulative Sums of Squares for Retrospective Detection of Changes of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, *89*(427), 913–923. https://doi.org/10.1080/01621459.1994.10476824

Jönsson, K. (2020a). Cyclical Dynamics and Trend/Cycle definitions: Comparing the HP and Hamilton filters. *Journal of Business Cycle Research*, *16*(2), 151–162. https://doi.org/10.1007/s41549-020-00039-x

Jönsson, K. (2020b). Real-time US GDP gap properties using Hamilton's regression-based filter. *Empirical Economics*, *59*(1), 307–314. https://doi.org/10.1007/s00181-019-01631-6

Kydland, F. E., Prescott, E. C., et al. (1990). Business Cycles: Real Facts and a Monetary Myth. *Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review*, *14*(2), 3–18. https://doi.org/10.21034/qr.1421

Lucas, R. E. (1995). Understanding business cycles. *Essential readings in economics*, 306–327. https://doi.org/10.1007/978-1-349-24002-9_17

Mileusnic, J. (2025). *Višedimenzioni modeli volatilnosti u analizi makroekonomske neizvesnosti: master teza*. Ekonomski fakultet u Beogradu.

Orphanides, A., & van Norden, S. (2002). The Unreliability of Output-Gap Estimates in Real Time. *The Review of Economics and Statistics*, *84*(4), 569–583. https://doi.org/10.1162/003465302760556422

Quast, J., & Wolters, M. H. (2022). Reliable Real-Time Output Gap Estimates Based on a Modified Hamilton Filter. *Journal of Business & Economic Statistics*, *40*(1), 152–168. https://doi.org/10.1080/07350015.2020.1784747

Ravn, M. O., & Uhlig, H. (2002). On adjusting the Hodrick-Prescott filter for the frequency of observations. *Review of economics and statistics*, *84*(2), 371–376. https://doi.org/10.1162/003465302317411604

Schüler, Y. S. [Yves S.]. (2018). Detrending and financial cycle facts across G7 countries: Mind a spurious medium term. *ECB Working Paper No. 2138; ISBN: 978-92-899-3243-1*. https://doi.org/10.2139/ssrn.3152820

Schüler, Y. S. [Yves S]. (2021). On the cyclical properties of Hamilton's regression filter. *Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=3559776*. https://doi.org/10.2139/ssrn.3559776

Serletis, A., & Liu, J. (2022). Inflation and economic activity in advanced and emerging economies. *International Journal of Finance & Economics*, *27*(4), 4196–4223. https://doi.org/10.1002/ijfe.2367

Siemers, L.-H. (2025). On the Hamilton-HP Filter Controversy: Evidence from German Business Cycles. *Journal of Business Cycle Research*, 1–43. https://doi.org/10.1007/s41549-025-00107-0

PRETHODNA VERZIJA

FINANSIJE I BANKARSTVO

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Pregledni članak

ZELENI FINANSIJSKI INSTRUMENTI

GREEN FINANCING INSTRUMENTS

IRENA JANKOVIĆ[1]

[1] Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Beograd, irena.jankovic@ekof.bg.ac.rs, 0000-0003-1115-4702

Rezime: *Zeleno finansiranje predstavlja obuhvatan ekonomski, društveni i ekološki koncept nastao sa ciljem efikasnije borbe sa negativnim posledicama klimatskih promena i preventivnog budućeg delovanja koje će doprineti održivom razvoju, kako na nacionalnom, tako i na međunarodnom nivou. U ovom radu prikazuju se relevantni instrumenti zelenog finansiranja sa posebnim fokusom na tradicionalne instrumente, finansijske inovacije i instrumente usmerene na klimatske promene. Rad pruža i pregled budućih mogućih koraka u razvoju zelenog finansiranja.*

Ključne reči: *Zeleno finansiranje, Finansijski instrumenti, Inovacije.*

Abstract: *Green financing represents a comprehensive economic, social and ecological concept created with the aim of more effective combating the negative consequences of climate change and preventive future action that will contribute to sustainable development, both at the national and international level. This paper presents the relevant instruments of green finance with a special focus on traditional instruments, financial innovations and climate change oriented instruments. The paper also provides an overview of possible future steps in the development of green financing.*

Keywords: *Green Financing, Financial Instruments, Innovations.*

1. UVOD

Pojam zeleno finansiranje odnosi se na finansijske proizvode i usluge koji podstiču održive investicione alternative i projekte. Oblasti koje pokriva ovakav oblik finansiranja obuhvataju, između ostalog, alternativne izvore energije, očuvanje biodiverziteta, prečišćavanje voda, upravljanje otpadom, zeleni saobraćaj, građevinarstvo i poljoprivredu. Instrumenti zelenog finansiranja usmeravaju finansijska sredstva prema privredi, državi i pojedincima koji u svojoj poslovnoj i investicionoj aktivnosti podržavaju održivost i smanjuju negativne uticaje svog delovanja na životnu sredinu.

Finansijske inovacije koje odlikuju i oblast ekološki odgovornog poslovanja olakšavaju tranziciju ka efikasnijem privređivanju omogućavajući lakše finansiranje projekata koji racionalnije koriste raspoložive resurse, smanjuju emisiju štetnih gasova i promovišu upotrebu alternativnih izvora energije – solarne, hidro, itd. Konačno, oblast zelenog finansiranja kreira nova radna mesta i nudi mogućnost ekološki svesnog privređivanja.

2. OKOLNOSTI U KOJIMA RASTE POTREBA ZA ZELENIM FINANSIRANJEM

Negativne posledice ubrzanih klimatskih promena oblikuju savremeno poslovanje i nameću značajna ulaganja država i privatnog sektora u istraživanje i razvoj novih oblika zelenih tehnologija i proizvodnih procesa. Kako *Morgan Stanley* predviđa na svetskom nivou će biti potrebno potrošiti preko 50 biliona USD kako bi se odgovorilo zahtevima Pariskog sporazuma i postigao status nultog nivoa emisije štetnih gasova koji rezultuju efektom staklene bašte (Klebnikov, 2019).

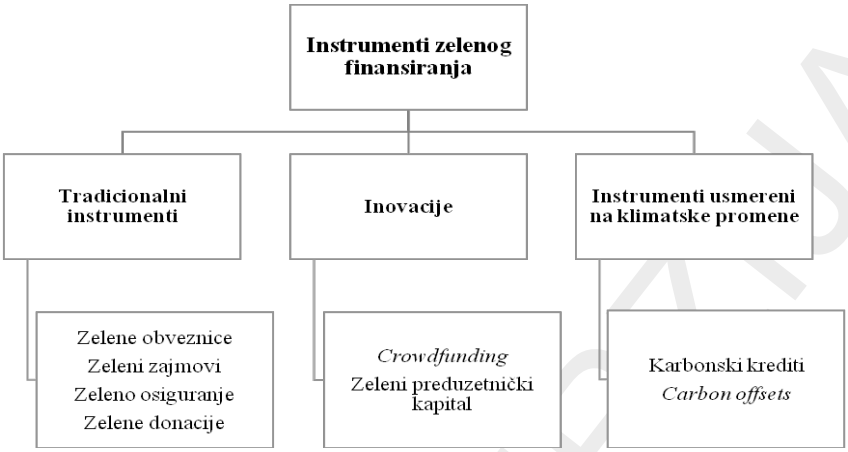
Proces transformacije proizvodnih i operativnih procesa preduzeća i njihovo usmerenje ka ekološki održivom poslovanju zahteva značajna finansijska sredstva. Vlade su svesne rastućih finansijskih potreba za ove namene kako na državnom tako i na sektorskim nivoima. U ovim okolnostima se javlja koncep zelenog finansiranja.

DRAFT VERZIJA

3. INSTRUMENTI ZELENOG FINANSIRANJA

Instrumenti zelenog finansiranja razvijaju se tokom vremena na osnovama klasičnih finansijskih instrumenata. Ključna razlika između njih jeste u tome što zeleni instrumenti imaju dvostruku svrhu – ostvarenje prinosa na uložena sredstva (koje često prati pozitivan poreski tretman) uz očuvanje i zaštitu prirodne sredine i redukciju negativnih efekata klimatskih promena.

Instrumenti zelenog finasniranja mogu se razvrstati u tri ključne kategorije – tradicionalni instrumenti, inovacije u oblasti zelenog finansiranja i instrumenti usmereni na klimatske promene (Chatterjee, 2023). Naredni prikaz pokazuje ključne kategorije i pojedinačne instrumente koji pripadaju svakoj od njih.



Shema 1: Instrumenti zelenog finansiranja

U kategoriju sada već tradicionalnih zelenih finansijskih instrumenata spadaju zelene obveznice, zeleni zajmovi, instrumenti zelenog osiguranja i zelene donacije i subvencije. U inovacije u oblasti zelenog finansiranja spadaju *Crowdfunding* i zeleni preduzetnički kapital. Konačno, poseban segment tržišta čine instrumenti usmereni na klimatske promene koji obuhvataju karbonske kredite i *Carbon offsets*. U nastavku će biti prikazane karakteristike svakog navedenog instrumenta i/ili mehanizma zelenog finansiranja.

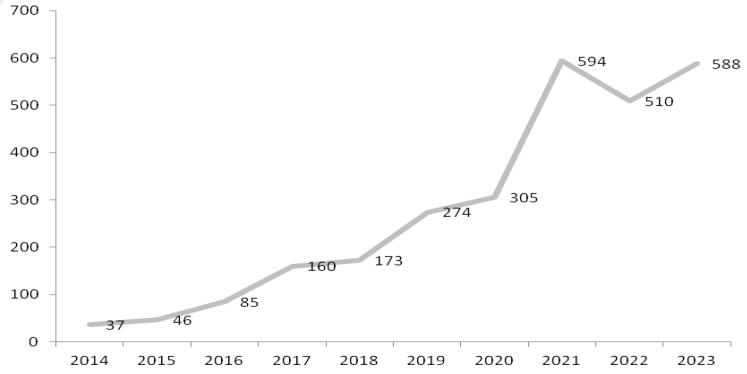
3.1. Zelene obveznice

Zelene obveznice jesu dužnički finansijski instrumenti koji se emituju sa ciljem prikupljanja finansijskih sredstava za realizaciju ekološki odgovornih projekata. Mogu ih emitovati domaće i međunarodne finansijske institucije, preduzeća, država i lokalne samouprave.

Prva zelena obveznica emitovana je od strane Evropske investicione banke 2007. godine. Tokom 2008. godine Svetska banka započela je emisiju zelenih obveznica prikupljajući sredstva za smanjenje negativnih posledica klimatskih promena. Od tada, do danas, tržište zelenih obveznica značajno se uvećava.

Prema podacima *Climate Bonds Initiative* tokom 2023. godine emitovano je na globalnom nivou 870 milijardi USD zelenih, socijalnih i obveznica usmerenih na održivost, 3% više u odnosu na godinu pre toga. Kumulativno posmatrano, vrednost emitovanih zelenih, socijalnih i obveznica održivosti dostiže time 4,4 biliona USD. Od ukupnog navedenog iznosa emitovanih obveznica u 2023. godini 68% čine zelene obveznice vrednosti 587,7 milijardi USD, što čini uvećanje od 15% u odnosu na 2022. godinu (Climate Bonds Initiative, 2025).

Naredni grafikon prikazuje vrednost emitovanih zelenih obveznica u periodu od 2014. do 2023. godine.



DRAFT VERSION

Grafikon 1: Vrednost emitovanih zelenih obveznica na globalnom nivou u periodu od 2014-2023. godine (u milijardama USD)

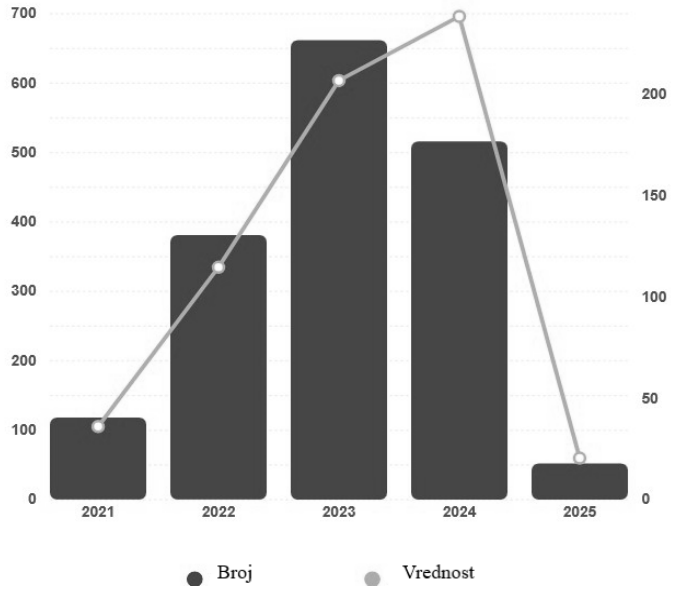
Izvor: *Climate Bonds Initiative* (2025)

Zelene obveznice pomažu mobilizaciju finansijskih sredstava od strane individualnih i institucionalnih investitora i njihovo usmeravanje ka projektima i poduhvatima koji su usmereni na održive izvore energije, privređivanje sa niskom emisijom štetnih gasova i druge ekološki odgovorne alternative. U ovome trenutku u preko 50 zemalja sveta emituju se ovi finansijski instrumenti.

3.2. Zeleni zajmovi

Zeleni zajmovi pomažu pojedincima, preduzećima i državi da finansiraju ekološki odgovorne projekte i poslovne poduhvate. Reč je o posebnoj vrsti zajmova prema svojoj nameni koja je suštinski dvostruka. Oni pomažu finansiranje profitabilnih i ekološki odgovornih, tzv. zelenih projekata. Kao rezultat, njih često karakteriše niža kamatna stopa u poređenju sa, po nivou rizika, sličnim „nezelenim" ili klasičnim zajmovima. Posmatrano iz ugla stanovništva zeleni zajmovi mogu pomoći finansiranje ugradnje solarnih panela, kupovine električnih vozila, izgradnje cisterni za sakupljanje kišnice i slično. Time se podstiče jedan efikasniji, održiv i kvalitetniji način življenja. Kada je reč o preduzećima koja počinju da uvode zelene prakse u svoje poslovanje često vlada pogrešno mišljenje da taj proces nužno prate viši troškovi i negativan uticaj na njihovu profitabilnost. Zeleni zajmovi mogu pomoći velikim kompanijama i malim i srednjim preduzećima da pređu na održivi vid poslovanja i ujedno steknu komparativnu prednost u poređenju sa klasičnim konkurentima signalizirajući klijentima, partnerima i investitorima da vode računa o širem ekološkom uticaju svojih aktivnosti. Principi koji daju smernice za strukturiranje zelenih zajmova, *Green Loan Principles*, razvijeni su od strane predstavnika vodećih finansijskih institucija aktivnih na globalnom kreditnom tržištu i usmereni na promociju razvoja i integriteta zelenih zajmova kao posebne vrste finansijskih instrumenata. Ipak, kako bi ovi principi bili primenjeni u praksi neophodno je da na svim tržištima postoje razvijeni standardi i jasna taksonomija zelenih zajmova kako bi se izbegle zloupotrebe u održivom finansiranju (engl. *Greenwashing*).

Javno raspoloživi podaci o odobrenim zelenim zajmovima prikazani su na grafikonu broj 2.



Grafikon 2: Broj i vrednost (u milijardama USD) odobrenih zelenih zajmova u periodu od 2021. do marta 2025. godine

Izvor: Environmental Finance Data (2025)

Prema informacijama *Environmental Finance Data* tokom 2024. godine vrednost odobrenih zelenih zajmova iznosila je 855,9 milijardi USD.

3.3. Zeleno osiguranje

Zeleno osiguranje ima za cilj da podstakne održivu proizvodnju i potrošnju kroz obezbeđivanje nižih premija osiguranja akterima u oblasti zelenog poslovanja. Na međunarodnom nivou finansijske institucije se

usmeravaju na usluge i proizvode u oblasti osiguranja koje su povezane sa održivošću. To je posebno slučaj nakon objavljivanja Principa održivog osiguranja (engl. *Principles for Sustainable Insurance*) od strane *UNEPFI* koji definišu na koji način osiguravajuće kuće treba da doprinesu agendi održivog razvoja pomažući im da kod zelenih projekata bolje i preciznije kvantifikuju rizike i pruže adekvatno pokriće.

Jedan od izazova kod osiguranja zelenih zajmova jeste pomenuto odsustvo jasnih definicija šta tačno čini konkretan zeleni proizvod koji se zajmom finansira. To otežava i ponudu adekvatnog pratećeg proizvoda osguranja. Jedan od takvih primera jesu električni automobili. Iako je poznato da električna vozila u manjoj meri zagađuju životnu sredinu u poređenju sa tradicionalnim vozilima, ona ipak imaju negativan ekološki uticaj. Litijumske baterije koje se koriste za pogon električnih automobila kreiraju značajan obim ekološkog otpada koji je teško na siguran način odlagati, skladištiti ili reciklirati. Tako da, čak i kada pred sobom imamo tzv. zeleni proizvod postavlja se pitanje da li je on u potpunosti zelen. To otežava ponudu adekvatnih proizvoda osiguranja i pravilno odmeravanje prateće premije osiguranja.

Istovremeno zeleno osiguranje je od vitalnog značaja za podsticanje daljeg razvoja zelenih proizvoda i usluga, posebno u zemljama u razvoju. Značajna izloženost klimatskim rizicima ugrožava ključne sektore u privredama koje se u velikoj meri oslanjaju i zavise od sektora poljoprivrede. Uticaj suša, poplava, značajnih temperaturnih promena, uragana i drugih vremenskih nepogoda podstiče sve veći broj poljoprivrednih proizvođača da zatraže usluge osiguranja svojih poljoprivrednih parcela i useva. Zeleno osiguranje podstiče održivost u poljoprivredi kroz ponudu raznovrsnih prilagođenih proizvoda i usluga osiguranja uz prihvatljiv nivo pratećih premija. Konačno, zeleno osiguranje podstiče kompanije koje generišu štetne efekte na životnu sredinu da internalizuju troškove svog negativnog ekološkog uticaja čime se bolje upravlja i ukupnim negativnim ekološkim eksternalijama.

3.4. Zelene donacije

Zelene donacije usmerene su na podsticanje lokalnih zajednica i privatnog sektora da pokreću projekte koji omogućavaju smanjenje uticaja ili prilagođavanje na negativne posledice klimatskih promena, efikasno upravljanje lokalnim prirodnim resursima i inovativne pristupe zaštiti prirodne sredine. Zelene donacije mogu biti ponuđene od strane države, filantropskih organizacija, privatnih fondacija i nevladinih organizacija. Zelene donacije se usmeravaju i ka istraživačkim centrima i univerzitetima kako bi se podstakla istraživanja na temu klimatskih promena i održivog razvoja. Time se pomaže zatvaranje finansijskog jaza za projekte koji imaju dobru namenu ali su, finansijski posmatrano, neprofitabilni, tj. bez prinosa na uložena sredstva. Primeri institucija koje deluju u ovoj sferi jesu npr. *Global Greengrants Fund*[1] koji kroz pristup odozdo na gore podstiče uključivanje lokalnih zajednica u sprovođenje inovativnih strategija za borbu sa efektima klimatskih promena kao i *Green Climate Fund* formiran pod okriljem *UNFCCC* 2010. godine koji primarno usmerava finansijsku pomoć ka najmanje razvijenim zemljama.[2]

3.5. Zeleni *Crowdfunding*

Crowdfunding predstavlja proces u kome preduzeća ili preduzetnici prikupljaju finansijska sredstva za svoje poslovne aktivnosti od velikog broja (tzv. pula) investitora od kojih svaki uobičajeno ulaže manji iznos novca bez pomoći klasičnih finansijskih posrednika. Ulaganje može biti filantropsko ili se može očekivati određeni prinos koji može biti finansijski, društveni i/ili ekološki. U odsustvu pristupa tradicionalnim mehanizmima finansiranja ovakav oblik prikupljanja sredstava može pomoći zelenim poslovnim poduhvatima započinjanje njihovih operacija. Kako bi zelene *Crowdfunding* platforme bile uspešne u prikupljanju sredstava one moraju na jasan način prezentovati ekološke i klimatske ciljeve poduhvata koji se finansira. Takođe, one se razlikuju prema tome da li su isključivo donatorski orijentisane ili prikupljaju sredstva u formi sopstvenog kapitala ili u formi pozajmice. Od toga zavise i očekivanja investitora o vrsti i visini mogućeg prinosa na uložena sredstva. U skladu sa tim zelena preduzeća moraju biti sposobna da jasno prikažu očekivane finansijske i ekološke prinose koji su rezultat njihovih aktivnosti kako bi privukli veći broj ulagača.

Platforme za *Crowdfunding* nose sa sobom i određene rizike. One se razlikuju prema nivou upravljačkih sposobnosti i operativnim standardima a, kako postaju sve brojnije, to investitorima otežava odabir pouzdane investicione alternative (Yin et al., 2024). Takođe, priliv sredstava kod ovakvih investicionih alternativa vrlo je volatilan i osetljiv na ekonomske šokove. Konačno, veliki broj zemalja nema razvijenu regulativu koja obuhvata oblast *Crowdfunding*-a.

[1] Videti više: Global Greengrants Fund. https://www.greengrants.org/
[2] Videti više: Green Climate Fund. https://www.greenclimate.fund/

3.6. Zeleni preduzetnički kapital

Zeleni preduzetnički kapital bavi se finansiranjem projekata i poslovnih poduhvata koji razvijaju održive tehnologije koje obezbeđuju zaštitu životne sredine i bore se sa negativnim posledicama klimatskih promena. Sektori u koje se usmerava ovako sakupljen kapital obuhvataju oblast energije, upravljanja otpadom, transport, građevinarstvo i druge srodne oblasti. Reč je o onim segmentima pomenutih delatnosti koje imaju otežan pristup drugim izvorima finasniranja. Na nove tehnologije usmereni zeleni *startup*-ovi imaju poteškoće da pribave kapital iz tradicionalnih izvora finasiranja usled visokih rizika koji prate ovaj vid investiranja.

U poslednje tri godine investicije u oblast održivih tehnologija čine preko 25% svih investicija finansiranih preduzetničkim kapitalom. Sektor transporta koji učestvuje sa oko 20% u svim emisijama štetnih gasova na globalnom nivou prati učešće od preko 60% u svim investicijama u oblasti zelenih tehnologija (Chatterjee, 2023). Sa druge strane, sektori poput održive poljoprivrede, građevinarstva i industrije ne raspolažu sa dovoljno finansijskih sredstava za ozelenjavanje njihovih proizvodnih procesa. Usmeravanje finansijskih sredstava u ove oblasti ubrzalo bi proces smanjenja emisije štetnih gasova dok bi svi pioniri u oblasti stekli komparativne prednosti kako u pogledu ostvarenja zacrtanih ekoloških tako i finansijskih ciljeva.

Intervencije države mogu dati svoj doprinos povećanju poverenja investitora u oblasti zelenog preduzetničkog ulaganja. Tradicionalne sheme subvencija države u mnogim zemljama i dalje favorizuju tradicionalne sektore privrede dok odsustvo poreskih podsticaja za zelene *startup*-ove može signalizirati nisku posvećenost ekološkim i klimatskim pitanjima. Sve pomenuto često obeshrabruje ekološke investicione aktivnosti podržane preduzetničkim kapitalom. Odsustvo regulatornih okvira za zelene investicije na tržištima značajnog broja zemalja stvara neizvesnost i za velike institucionalne investitore. Kako bi se podstaklo zeleno preduzetničko investiranje neophodno je definisati set standarda koji definiše šta su to zeleni sektori i obezbediti stabilne tokove kapitala u ove sektore kako bi finansirani projekti bili suštinski održivi. Sa druge strane, postoje tržišta, poput SAD i Kine, koja odlikuju poreske olakšice i krediti za preduzeća koja se usmeravaju u zelene oblasti privređivanja.

3.7. Karbonski krediti i *Carbon Offsets*

Na samitu o klimatskim promenama *Glasgow COP26* 2021. godine zemlje učesnici su se dogovorili o kreiranju globalnog tržišta karbonskih kredita. Jedan karbonski kredit dopušta konkretnoj kompaniji da emituje do jedne tone ugljen-dioksida u atmosferu. Po uloženim naporima da svoje poslovanje učine ekološki odgovornijim i eksterne verifikacije kompanijama se dodeljuje određeni broj karbonskih kredita koji omogućavaju ograničen obim zagađivanja životne sredine. Kompanije mogu prodavati neiskorišćene karbonske kredite i prikupljenim finansijskim sredstvima dodatno finansirati ekološki održive aktivnosti. Ponuda kredita se smanjuje svake godine podstičući kompanije da smanje nivo emisije štetnih gasova i prilagode svoje poslovanje ekološki prihvatljivim obrascima. Instrument pod nazivom *Carbon offset* se odnosi na otklanjanje/skladištenje do jedne tone već emitovanih štetnih gasova iz atmosfere.

Tabela 1: Karakteristike karbonskih kredita i *carbon offsets*

Karbonski krediti	***Carbon Offsets***
Njima mogu trgovati velike kompanije i države	Dostupni fizičkim licima, malim i velikim preduzećima
Omogućavaju emisiju do jedne tone ugljen-dioksida po jednom kreditu	Podržavaju projekte koji uklanjaju štetne gasove već emitovane u atmosferu
Trgovanje reguliše i nadzire država	Trgovanje na dobrovoljnoj osnovi

Izvor: Prikaz autora prema Becis (2025)

Tržište navedenih karbonskih instrumenata pruža mogućnost zemljama u razvoju da unaprede svoj društveno-ekonomski razvoj u procesu prelaska ka održivom privređivanju.

4. BUDUĆI KORACI U RAZVOJU ZELENIH FINANSIJSKIH INSTRUMENTA

Adekvatna regulatorna podrška jeste od ključnog značaja za razvoj zelenih oblika finansiranja i tranziciju i javnog i privatnog sektora ka održivom razvoju. Set neophodnih koraka naveden je u nastavku.

Prvi korak podrazumeva povećenost države borbi sa klimatskim promenama i razvoj konkretnih politika i strategija koje su usmerene ka ostvarenju konkretnih ekoloških ciljeva. Postojanje razvijenih zelenih politika, strategija i akcionih planova koji emituju poruku investicionoj javnosti da je konkretna zemlja posvećena

DRAFT VERSION

dugoročnom održivom razvoju treba da je praćena adekvatnom finansijskom podrškom u formi poreskih izuzeća, donacija i subvencija za ekološki održive investicije. Na taj način se uvećava poverenje investitora i to može rezultovati rastom zelenih ulaganja.

Drugi korak odnosi se na razvoj klasifikacionih sistema, takozvane zelene taksonomije, koja jasno definiše šta čini proizvod i uslugu zelenom i održivom. Ovakav vid klasifikacija na nacionalnom i međunarodnom nivou olakšava regulatorima, kompanijama i investitorima da adekvatno i jednoobrazno ocenjuju ekološki uticaj poslovne aktivnosti i investicija. Na finansijskim tržištima razvijena zelena taksonomija smanjuje nivo informacione asimetrije i podstiče investitore da ulažu rapoložive viškove u neosporno zelene projekte i inicijative. Preduzeća postaju svesna konkretnog ekološkog uticaja koji generišu svojim poslovanjem i mogućih dozvoljenih alternativnih pravaca delovanja. Zelena taksonomija smanjuje rizik zloupotrebe u procesu finansiranja i investiranja. Ona podstiče standardizaciju u procesu izveštavanja o ekološkom uticaju poslovanja i na taj način omogućava investitorima da donesu informisanu odluku o ulaganju raspoloživih sredstava.

Treći korak jeste povezivanje pojedinačnih tržišta sa međunarodnim tržištem karbonskih finansijskih instrumenata što doprinosi efektnijem smanjenju emisije štetnih gasova i harmonizaciji cena karbonskih instrumenata među različitim jurisdikcijama. Kako bi se ostvarila ovakva integracija neophodna je međunarodna kooperacija i standardizacija dozvoljenih nivoa štetnih emisija kao i adekvatna supervizija čitavog procesa.

Konačno, u zemljama koje emituju zelene obveznice poželjno je njihovo uključivanje u relevantne međunarodne indekse obveznica što indirektno verifikuje kvalitet pomenutih instrumenata i privlači u većoj meri i međunarodne investitore u ove instrumente.

5. ZAKLJUČAK

Zeleno finansiranje podrazumeva usmeravanje finansijskih sredstava u ekološki odgovorne projekte i inicijative. Kao obuhvatan koncept od presudnog je značaja za borbu sa negativnim posledicama klimatskih promena, zaštitu prirodne sredine i ubrzavanje održivih oblika privrednog razvoja. Formulisanje relevantnih regulatornih okvira i standarda u oblasti zelenog finansiranja podstiče investiranje u ekološki odgovorne aktivnosti i projekte kako na nacionalnom tako i na međunarodnom nivou. Kreiranje inovativnih finansijskih instrumenata u ovoj oblasti nudi niz mogućnosti i pogodnosti za investitore koji pored prinosa na uložena sredstva teže ostvarenju i širih društvenih i ekoloških ciljeva.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje dobilo je finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

LITERATURA

Becis. (2025). Carbon Offsets vs Carbon Credits: Explore Their Key Differences. https://be-cis.com/carbon-offsets-carbon-credits/

Chatterjee, D. (2023, March 05). 7 popular Green Financing instruments you need to know about. *Neufin*. https://neufin.co/blog/green-financing-instruments/

Climate Bonds Initiative (2025). https://www.climatebonds.net/market/data/

Environmental Finance Data (2025). https://efdata.org/

Global Greengrants Fund. https://www.greengrants.org

Green Climate Fund. https://www.greenclimate.fund/

Klebnikov, S. (2019, October 24). Stopping Global Warming Will Cost $50 Trillion: Morgan Stanley Report. *Forbes*. https://www.forbes.com/sites/sergeiklebnikov/2019/10/24/stopping-global-warming-will-cost-50-trillion-morgan-stanley-report/

Yin, Z., Huang, G., Zhao, R., Wang, S., Shang, W. L., Han, C., & Yang, M. (2024). Information disclosure and funding success of green crowdfunding campaigns: a study on GoFundMe. *Financial Innovation*, *10*(1), 147. https://doi.org/10.1186/s40854-024-00666-8

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

ФОН
UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

ФИНАНСИРАЊЕ ВОЈНЕ АКАДЕМИЈЕ У ФУНКЦИЈИ РАЗВОЈА ЊЕНИХ КАПАЦИТЕТА

FINANCING THE MILITARY ACADEMY IN FUNCTION OF THE DEVELOPMENT OF ITS CAPACITIES

МИЛЕНА КНЕЖЕВИЋ[1], ДРАГАНА СТОИЉКОВИЋ-НИКОЛИЋ[2], АЊА ЈЕИНА[3]

[1] Универзитет одбране у Београду, Војна академија, Београд, milena.knezevic@mod.gov.rs, 0000-0003-2814-7453
[2] Универзитет одбране у Београду, Војна академија, Београд, sndragana@gmail.com, 0009-0002-4417-5147
[3] Универзитет одбране у Београду, Војна академија, Београд, anjaajeina@gmail.com, 0009-0008-9674-4835

Резиме: *У ери интернета и вештачке интелигенције веома је тешко заинтересовати младе за традиционално учење и студирање. Додатни проблем високог школства данас јесте што је све мањи природни прираштај. Такође, тако умањен број младих последњих година има друге приоритете и интересовања у односу на претходне генерације. Војна академија која ове године прославља 175 година постојања, иако има дугу традицију, прати савремене трендове у науци и настави и тежи ка све већем одзиву кандидата упркос већ наведеним чињеницама. Стога је на Војној академији покренут пројекат „Вредносне орјентације и однос према традицији кадета Војне академије“. У оквиру овог пројекта рађене су анкете у вези са задовољством кадета у току школовања на Војној академији. Задовољство кадета током школовања у значајној мери утиче на изградњу и развој капацитета институције, квалитет школовања, успех у учењу самих кадета али и на њихов будући рад у јединицама и установама Војске Србије.*

Предмет овог рада је испитивање утицаја начина финансирања Војне академије на задовољство кадета, у контексту развоја њених институционалних капацитета. Циљ рада јесте да се да се укаже на могуће правце унапређења система финансирања у функцији развоја капацитета ове институције.

Кључне речи: *капацитети, задовољство, кадети Војне академије, систем финансирања.*

Abstract: *In the era of the Internet and artificial intelligence, it is very difficult to interest young people in traditional learning and studying. An additional problem of higher education today is that the natural increase is decreasing. Also, the number of young people who have decreased in recent years has other priorities and interests compared to previous generations. The Military Academy, which is celebrating its 175th anniversary this year, although it has a long tradition, follows modern trends in science and teaching and strives for an increasing response from candidates despite the already mentioned facts. Therefore, the Military Academy launched the project "Value orientations and attitude towards the tradition of Military Academy cadets". As part of this project, surveys were conducted regarding the satisfaction of cadets during their education at the Military Academy. Cadet satisfaction during schooling significantly affects the building and development of the institution's capacity, the quality of schooling, the learning success of the cadets themselves, but also their future work in units and institutions of the Serbian Armed Forces.*

Предмет овог рада је испитивање утицаја начина финансирања Војне академије на задовољство кадета, у контексту развоја њених институционалних капацитета. Циљ рада јесте да се да се укаже на могуће правце унапређења система финансирања у функцији развоја капацитета ове институције.

Keywords: *capacities, satisfaction, Military Academy cadets, financing system.*

DRAFT VERSION

1. УВОД

Интезивирањем ратних сукоба у свету последњих година „Поново је постало јасно да, иако не једино, употреба војне силе ипак остаје значајно средство у међународној политици“ (Milenković i dr. 2025, 102). Међутим, „величина“ војне силе се различито мерила кроз историју у смислу да је некад већу војну силу имала држава која има многобројнију пешадију, касније авијацију, а данас са развојем беспилотних летилица и сателитских навођења преимућство имају они који имају знање да управљају и користе исте. Стога је потреба за школованим и обученим официрским кадром за руковање и управљање најсавременијим војним оружјима све израженија и потребнија.

Са друге стране, нове генерације официра уче другачије од претходних (Barreiros dos Santos 2019, 124-125). Све већа употреба нових технологија у војном образовању може значајно допринети реализацији пројектованих циљева.

Историјско искуство је елемент без кога је тешко сагледати стварну улогу војске и војне професије у друштву, јер је без суштинског разумевања прошлости немогуће разумети садашњост, али исто тако ни поуздано предвидети будућност.

Пратећи промене у високом образовању Републике Србије, Министарство одбране и Војска Србије су предложили а Влада Републике Србије усвојила и 2011. године формирала Универзитет одбране у Београду. Универзитет одбране у Београду је првобитно основан са Војном академијом и Медицинским Факултетом ВМА. Касније су Универзитету додати Институт за стратегијска истраживања и Школа националне одбране.

Као високошколска установа, Универзитет одбране обавља делатност високог образовања кроз академске студијске првог, другог и тећег степена из више научних области у оквиру образовно-научних поља: друштвено хуманистичких, техничко технолошких и медицинских наука.

Међутим, Универзитет одбране школује и образује лица тежишно за потребе система одбране Републике Србије, али и за потребе других оружаних снага како из окружења тако и шире. Како је већ наведено, Универзитет одбране иако тек недавно основан, има традицију школовања војног кадра дугу скоро 2 века. Кадар који је школован у војним школама Србије има традицију и висок квалитет што је препознато у војним круговима широм света али и од стране свих привредних грана у Републици Србији.

Оружани сукоби у 21. веку се одвијају са савременом и софистицираном техником, високо обученим али пре свега школованим кадром. Улагање у одбрану сваке државе представља уједно и улагање у њену слободу и независност. Историја и наша богата искуства су нас научили да се никада не смемо искључиво ослонити на страно наоружање већ треба да улажемо у развој и производњу сопственог наоружања. Наравно техника без обученог кадра не претставља ослонац у одбрани, што нам показују искуства ратова данашњице. Поред остваривања бољег и стабилнијег мира путем рата, функција оружаних снага је и очување и заштита постојећег мира, уколико то стање омогућава прихватљив живот друштва (Станар, 2021., стр.42). Стога развој војних наука у савременом друштву никако не може да се одвија без финансијких улагања у материјалну и наставну базу Универзитета одбране.

У овом раду биће анализиран систем финансирања Војне академије и његов утицај на задовољство кадета, у функцији развоја њених институционалних капацитета.

2. СИСТЕМ ФИНАНСИРАЊА ВОЈНЕ АКАДЕМИЈЕ

Војна академија је део Универзитета одбране у Београду. Универзитет одбране је од оснивања део Министарства одбране и његово финансирање је регулисано свим законским и подзаконским актима за буџетске кориснике (Кнежевић и др., 2021, стр,103). Обзиром да је Министарство одбране директни буџетски корисник, све процедуре око израде и извршења буџета регулисане су Законом о буџетском систему.

Од оснивања Универзитета, односно од 2011. године финансирање свих активности је реализовано средствима из буџета. Обзиром да је то био период рестриктивног финансирања буџетских корисника Србије и финасирање војног образовања је било рестриктивно, што се одразило на снабдевање материјалне базе али и на модернизацију исте. Опште је познато да младе генерације савременог доба које тренутно представљају између осталог и кадети Војне академије, имају захтеве и потребе које се немогу поредити са ранијим генерацијама.

Схватајући ситуацију у којој се налази, дух времена и тековине глобализације, менаџмент Универзитета и Министарства одбране је 2015. године донео одлуку да формира Буџетски фонд за

ОДБРАНА

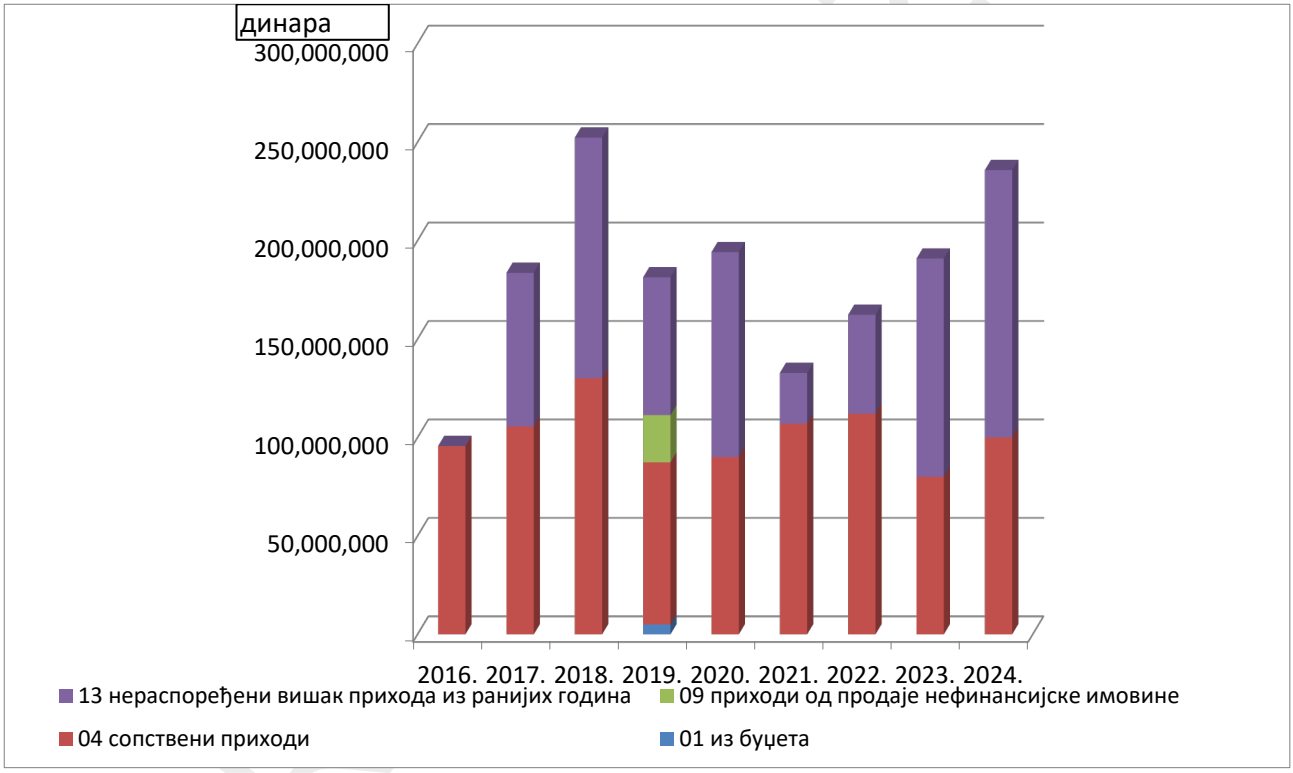
развој војног образовања и војне научноистраживачке делатности како рестриктивно финансирање не би негативно утицало на квалитет али и квантитет војног образовања.[1]

Буџетски фонд за развој војног образовања и војне научноистраживачке делатности је формиран са циљем да сопствени приходи које остваре Војна академија и Медицински факултет ВМА, по основу образовања и научноистраживачке делатности, остану на располагању Универзитету и да се тако обезбеде услови за развој капацитета војног образовања. Јер, смисао овог Буџетског фонда јесте да се увећају укупно расположива финансијска средства Универзитета.

Прва година када су Законом о буџету планирана финансијска средства из Буџетског фонда је била 2016. година и тада је планирано приближно 80 милиона динара из сопствених прихода. Због не постојања нормативне регулативе за утрошак ових средстава у току 2016. године нису реализована финасисијска средстав из Буџетског фонда и у целости су пренета у 2017. годину као извор 13, нераспоређени вишак прихода.

У току 2017. године, у Буџетском фонду, планирано 103,5 милиона динара из сопствених прихода и у целости неутрошени приходи из претходне године као извор 13, нераспоређени вишак прихода.

Као што је и приказано на Графикону 1, у току 2018. године је слична ситуација као и у 2017. години, планирано је нешто више сопствених прихода и неутрошени приход из претходне године. Међутим у 2019. години, поред ова два извора планирано је и финансирање средствима из буџета, извор 01 и примањима од продаје нефинансијске имовине извор 09.



Графикон 1. Извори финансирања БФ

У 2020. и 2021. години за Буџетски фонд планирана су финансијска средства искључиво из сопствених прихода и нераспоређеног вишка прихода.

Од 2022. године, Буџетски фонд не постоји и уведена је програмска активност Унапређење стања у области војног образовања и војне НИД са истим циљем додатног финансирања капацитета војног образовања. Извори финансирања су остали исти као и за Буџетски фонд.

Као што је већ наведено, финансирање текућег функционисања Универзитета обезбеђује се у целости средствима из буџета у оквиру Програмске активности Функционисање Министарства одбране и Војске Србије (Нешевски и др., 2023. стр 137). Овако распоређена средства Универзитету су довољна за финансирање енергената, тошкова путовања, плата кадета и ученика, хонорара спољних сарадника, текућих поправки и одржавања, административног материјала, материјала за науку и

[1] Веома је важно нагласити да је заинтересованост кандидата за школовање на Војној академији почела драстично да опада баш у то време и требало је одреаговати и изборити се за већу заинтересованост ради бољег одабира и квалитетнијег кадра.

осталих основних услуга и материјала за редовно функционисање и одржавање постојећих способности и капацитета Универзитета.

3. АНАЛИЗА ЗАДОВОЉСТВА КАДЕТА НА ВОЈНОЈ АКАДЕМИЈИ

На Војној академији је у 2024. години анкетиран укупно 201 кадет за потребе реализације пројекта «Вредносне оријентације и однос према традицији кадета Војне академије (ВА/ДХ/1/24-26)». Старосна доб анкетираних кадета је 19 до 21 година. Од укупног броја анкетираних кадета девојке чине 27,4%, а мушкарци 72,6%. Пореклом су са села 30,3% и града 69,7% (из Београда 11%, града величине до 50.000 становника -31,8%, малог града -26,9%). Потичу из радничке породице 53,7%, породице професионалниг војног лица – 21,4%, земљорадничке – 5,5% и предузетничке – 14%. Кадети који су анкетирани су завршили углавном средњу цивилну школу -28,4%, војну гимназију – 17,3% и цивилну гимназију – 24,4%. У току школовања остварили су: одличан успех њих 30,8%, врло добар – 54,2% и добар – 14,9%.

Табела 1. Анкета кадета Војне академије

ПИТАЊЕ	ОЦЕНА					
	ПОТПУНО НЕТАЧНО	УГЛАВНОМ НЕТАЧНО	НИСАМ СИГУРАН	УГЛАВНОМ ТАЧНО	ПОТПУНО ТАЧНО	**Просечна оцена**
	1	2	3	4	5	
Услови смештаја на Војној академији су адекватни	10	36	25	91	39	**3,56**
Услови наставе и обуке на Војној академији су адекватни	8	16	22	112	43	**3,83**
Одећа и обућа на Војној академији је адекватна	0	0	63	87	51	**3,94**
Здравствено збрињавање кадета је адекватно	0	0	36	83	82	**4,23**
Друге услуге логистичке подршке (прање, хемијско чишћење, берберске услуге, потрошни материјал за хигијену)	25	46	25	64	41	**3,25**
Услови за ваннаставне активности (секције, спорт, хоби, забава и др.) на Војној академији су адекватни	0	0	37	73	91	**4,26**

Извор: анкета кадета

Од укупног броја питања из анкете било је шест питања која се односе на задовољство кадета стандардом на Војној академији а који се финансира директно средствима из Програмске активности за унапређење стања у области војног образовања и војне научноистраживачке делатности. У Табели 1, дат је приказ питања кадета и оцене по принципу Ликертове скале, у распону 1 - 5 где је са 1 – означен одговор: „потпуно нетачно“, до оцене 5 – „потпуно тачно“.

Дескриптивна статистика анализираних варијабли јасно показује ставове анкетираних где су оцене свих посматраних варијабли надпросечне. Најбоље оцењене варијабле су *Здравствено збрињавање кадета је адекватно* са оценом M = 4,23 као и *Услови за ваннаставне активности (секције, спорт, хоби, забава и др.) на Војној академији су адекватни* оцењена са M = 4,26.

Највећом оценом је оцењено питање *Услови за ваннаставне активности (секције, спорт, хоби, забава и др.) на Војној академији су адекватни,* 45% анкетираних кадета је написало да је то потпуно тачно и дало оцену 5, њих 36% је заокружило 4, односно написало да је та констатација углавном тачна. Улагање у набавке намештаја, реновирање смештајних капацитета финансијских средствима за развој војног образовања дало је резултате и утицало директно на изузетно високо задовољство кадета истим.

По питању *Услови за ваннаставне активности (секције, спорт, хоби, забава и др.) на Војној академији,* кадети су дали оцену 4,26. Интересантан је податак да нико од анкетираних кадета није дао оцену 1 или 2, већ су оцењивали најниже са оценом 3-нисам сигуран њих 19%, оценом 4-углавном тачно њих 36%, а највише анкетираних је дало оцену 5-потпуно тачно, њих 45%. Такође се последњих година интезивно улажу финансијска средства у ваннаставне активности, а која су опредељена за развој војног образовања и резултати су оправдани јер су кадети веома задовољни.

DRAFT VERZIJA

Следеће питање по величини оцене је *Здравствено збрињавање кадета је адекватно,* кадети су дали оцену 4,23. Као и за претходно питање нико од анкетираних кадета није дао оцену 1 или 2, већ су оцењивали најниже са оценом 3-нисам сигуран њих 18%, оценом 4-углавном тачно њих 41% анкетираних и оцену 5-потпуно тачно исто 41% анкетираних кадета.

Одећа и обућа на Војној академији адекватна је од стране анкетираних кадета и оцењена оценом 3,94. Највише анкетираних кадета је дало оцену 4-углавном тачно, док је њих 31% дало оцену 3-нисам сигуран, и најмање, односно 26% се изјаснило да је констатација да су одећа и обућа адекватни. Финансирање набавки одеће и обуће углавном се реализује средствима из буџета, која су рестриктивна и ограничена. Стога је предлог, како би се побољшали ови параметри да се део средстава намењених за развој војног образовања преусмери за ову намену.

Финансирање наставе и обуке, изворно се реализује средствима из буџета, а што је утицало на то да анкетирани кадети по питању *Услови наставе и обуке на Војној академији су адекватни*, дају оцену 3,83. Највише анкетираних кадета, њих 56%, дало је оцену 4-углавном тачно. Предлог је да се и ова активност финансира додатним средствима како би се побољшали наведедни услови.

То је изузетно висока оцена када се узме у обзир да су многи данашњи изазови везани за ширину и разноврсност знања и неопходних вештина нових генерација официра. Нове генерације (нпр. миленијалци) уче другачије од претходних (Barreiros dos Santos 2019, 124-125). Све већа употреба нових технологија у војном образовању може значајно допринети реализацији пројектованих циљева. Како се нове технологије развијају, оне нуде иновативне методологије и алате који побољшавају ефикасност образовања и обуке (Вулетић, 2017, стр. 308).

Анкетирани кадети су најнижом оценом оценили чињеницу *Друге услуге логистичке подршке (прање, хемијско чишћење, берберске услуге, потрошни материјал за хигијену),* и то са оценом 3,25. Финансирање других услуга логистичке подршке се као и набавке обуће и одеће углавном реализује средствима из буџета, која су рестриктивна и ограничена. Стога је исти предлог, како би се побољшали ови параметри да се део средстава намењених за развој војног образовања преусмери за ову намену.

Анализом датих података може се закључити да је формирање Буџетског фонда, касније Програмске активности за развој војног образовања била одлична одлука управљачких структура Универзитета одбране. Финансијска средства која су уложена за развој војног образовања у значајној мери су допринела унапређењу квалитета услова смештаја кадета, опремању савременом рачунарском и другом опремом за науку, а што су кадети итекако препознали и оценили највишим оценама. Знатно ниже оцене кадети су дали за активности у које се није толико улагало из посматраних и анализираних средстава. Стога остаје да се размишља у правцу издвајања средстава и за ове намене како би се задовољство кадета употпунило.

4. ПРОЈЕКЦИЈА ФИНАНСИЈСКИХ ИЗДВАЈАЊА ЗА РАЗВОЈ ВОЈНОГ ОБРАЗОВАЊА И ЊИХОВ МОГУЋИ УТИЦАЈ НА ЗАДОВОЉСТВО КАДЕТА

Обзиром да је анкетирање кадета на ову тему рађено први пут након дужег времена, да не постоје историјски подаци о њиховом задовољству последњих година изузев 2024. године, не постоје ни подаци за поређење истих. Али, постоје релевантни подаци о финансирању Војне академије по годинама од 2016. године, по контима економске класификације и датим наменама утрошка. Такође, у анализираном периоду је утврђено по којим параметрима је највеће задовољство кадета а по којим најниже.

Методом линеарне регресије, а на основу процењене функције тренда, прогнозирана је вредност варијабле утрошених финансијских средстава за развој војног образовања за наредне три године (Табела 2).

Табела 2. Пројектовање финансијских средстава за развој војног образовања, 2026-2028. г

Године	Годишња прогноза (милиони динара)
2026.	277,51
2027.	301,10
2028.	326,70

Извор: Прорачун аутора

DRAFT VERZIJA

Претпоставка је да уколико би се у наредним буџетским годинама остварила ова финансијска средства и део њих определио за мање оцењене параметре задовољства кадета на Војној академији, то би утицало да се повећа њихово свеукупно задовољство, а то би у значајној мери утицало на раст квалитета и у крајњем капацитета Војне академије.

5. ЗАКЉУЧАК

Закључујемо да свет улази у еру отворених ратних сукоба, да је давно прошло време хладног рата. Да се техничко-технолошки напредак увек иницирао у војне сврхе, а тек касније налазио примену у широј мирнодопској потрошњи. Да су за примену савремене софистициране технике и технологије неопходни школовани и обучени официри, који су пре свега задовољни послом којим се баве, а пре тога наставом и обуком на Војној академији.

Такође, закључујемо да се Војна академија финансира средствима из буџета као део Универзитета одбране и Министарства одбране као директног корисника буџетских средстава, да се у прошлим временима показало да су то недовољна финансијска средства, да је држава препознала потребу развоја и унапређења војног образовања и основала Буџетски фонд за развој војног образовања и војне научноистраживачке делатности.

Средствима из наведеног фонда финансирано је опремање намештајем и реновирање смештајних капацитета Војне академије, набавка опреме за образовање и науку, административне опреме и материјала за науку. Спроведена анкета 2024. године недвосмислено указује на оправданост ових улагања.

Савремено друштво, у аксиолошком смислу, поставља индивидуално испред колективног, цени ново и лично а одбацује трајно и опште, воли уживање без труда и брза задовољства без истрајног рада (Старчевић, 2024. стр.20).

На крају, закључујемо, да предикција задовољства кадета није само слово на папиру већ захтева увећана издвајања финансијских средстава за потребе развоја војног образовања, јер војно образовање у савременим условима и постојећем окружењу треба да буде императив сваке државе.

ЗАХВАЛНИЦА

Овај рад је настао као резултат истраживања за потреба реализације пројекта „Вредносне оријентације и однос према традицији кадета Војне академије (ВА/ДХ/1/24-26)".

ЛИТЕРАТУРА

Barreiros dos Santos, L. A., N. A. R. S. Loureiro, J. M. M. do Vale Lima, J. A. de Sousa Silveira, and R. J. da Silva Grilo. 2019. „Military Higher Education Teaching and Learning Methodologies: An Approach to the Introduction of Technologies in the Classroom." *Security and Defence Quarterly 24 (2)*: 123-154. DOI: 10.35467/sdq/108668.

Knezević, M., Nikolić, S. i Neševski, A. (2021). Kontrola budzeta u funkciji civilne demokratske kontrole vojske u Republici Srbiji, Vojno delo, 2, 103-120.

Stanar, Dragan. 2021. „Mir kao svrha vojske." Vojno delo, 73(3), 36–47. DOI: 10.5937/vojdelo2103036S

Starčević, Srđan. 2024. „Povratak obaveznog služenja vojnog roka u Evropi – društveni determinizam i perspektive." Politika nacionalne bezbednosti 15(26): 11–26. DOI: 10.5937/pnb26-50140

Vuletić, Dejan. 2017. „Upotreba sajber prostora u kontekstu hibridnog ratovanja." *Vojno delo 69 (7)*: 308-325. DOI: 10.5937/vojdelo1707308V

Neševski, A., Milenković, D., & Knežević, M. (2023). Uticaj sopstvenih prihoda na razvoj kapaciteta Univerziteta odbrane u Republici Srbiji. *Ekonomija: teorija i praksa*, 26(2), 137-150.

ЕКСПЕРТСКА ВЕРЗИЈА

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

OD KLASIČNE DO SAVREMENE PRIMENE METODE ULANČANIH LESTVICA ZA PROCENU REZERVACIJA ZA ŠTETE

FROM CLASSICAL TO MODERN APPLICATION OF THE CHAIN-LADDER METHOD FOR CLAIMS RESERVE ESTIMATION

JELENA KOČOVIĆ[1], MARIJA KOPRIVICA[2], KRISTINA BRADIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Beograd, jelena.kocovic@ekof.bg.ac.rs, 0000-0003-3219-4746
[2] Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Beograd, marija.koprivica@ekof.bg.ac.rs, 0000-0003-4239-2252
[3] Univerzitet u Beogradu, Ekonomski fakultet, Beograd, kristina.bradic@ekof.bg.ac.rs

Rezime: *Solventnost osiguravajuće kompanije predstavlja njenu dugoročnu sposobnost da blagovremeno izmiruje svoje obaveze prema osiguranicima. Direktiva Solventnost II, koja se primenjuje u zemljama članicama Evropske unije, pored zahtevanog kapitala i pravila investiranja, poseban značaj daje tehničkim rezervama kao važnom faktoru adekvatnosti kapitala osiguravača. U neživotnom osiguranju, ključna stavka tehničkih rezervi su rezervacije za štete, koje predstavljaju aktuarsku procenu neizmirenih obaveza prema osiguranicima na dan obračuna. Preciznost ove procene u velikoj meri zavisi od načina primene aktuarske metode rezervisanja. Predmet ovog rada je primena metode ulančanih lestvica (Chain-Ladder) za procenu rezervacija za štete, uz korišćenje alata razvijenog u Microsoft Excel okruženju, koji omogućava brži i tačniji obračun. Cilj rada je da se ukaže na značaj upotrebe savremenih alata prilikom primene klasičnih aktuarskih metoda, radi dobijanja što realnijih procena rezervacija za nastale prijavljene i neprijavljene štete. Adekvatnost rezultata zavisi od kvaliteta podataka, ispunjenosti pretpostavki za primenu metode rezervisanja i ekspertskih znanja aktuara koji je primenjuje.*

Ključne reči: *rezervacije za štete, metoda ulančanih lestvica, Excel alat, neživotno osiguranje.*

Abstract: *The solvency of an insurance company represents its long-term ability to meet obligations to policyholders on time. The Solvency II Directive, which is applied in European Union member states, places special emphasis, alongside capital requirements and investment rules, on technical provisions as a key component of capital adequacy. A central element of technical provisions in non-life insurance is claims reserves, which represent the actuarial estimate of outstanding liabilities to policyholders as of the valuation date. The accuracy of this estimate largely depends on how the actuarial reserving method is applied. The subject of this paper is the application of the Chain-Ladder method for estimating claims reserves, using a tool developed in the Microsoft Excel environment that enables faster and more accurate calculations. The paper aims to highlight the importance of using modern tools when applying classical actuarial methods, in order to obtain more realistic estimates of reserves for incurred, reported and unreported claims. The adequacy of the results depends on the quality of the data, the fulfilment of the assumptions required for applying the reserving method, and the expertise of the actuary who applies it.*

Keywords: *claims reserves, Chain-Ladder method, Excel-based tool, non-life insurance.*

1. UVOD

Koncept Solventnost II stavlja u prvi plan tehničke rezerve kao najznačajniju stavku pasive bilansa stanja osiguravajućih kompanija, koja ima ključni uticaj na adekvatnost kapitala za pokriće preuzetih rizika. Rezervacije za štete su, sa svoje strane, najznačajnija stavka tehničkih rezervi u neživotnom osiguranju. Od toga da li su rezervacije za štete dobro obračunate, a posledično i da li njihovi procenjeni iznosi mogu da pokriju neizmirene buduće obaveze prema osiguranicima, zavise likvidnost i solventnost osiguravača. Ukoliko test adekvatnosti obaveza ukaže na potcenjenost rezervacija za štete, osiguravajuća kompanija je u obavezi da uveća njihovu knjigovodstvenu vrednost kako bi obezbedila kontinuitet u blagovremenom ispunjavanju svih

DRAFT VERZIJA

obaveza prema osiguranicima (Kočović et al., 2023). Stoga je veoma važno da se primeni adekvatna aktuarska metoda za obračun rezervacija za štete.

Među najznačajnijim deterministčkim metodama rezervisanja izdvajaju se: metoda ulančanih lestvica (*Chain-Ladder*), metoda očekivanog racija šteta (*Expected Loss Ratio*) i *Bornhuetter–Fergusonov*-a metoda. U praksi se najčešće koristi metoda ulančanih lestvica, pod uslovom da su zadovoljeni svi preduslovi za njenu upotrebu. Ova metoda, i pored izvesnih nedostataka (Kočović et al., 2012), daje zadovoljavajuće rezultate, što opravdava njenu široku primenu. U radu će biti prikazane teorijske osnove metode ulančanih lestvica, a zatim i njena implementacija na podacima konkretne osiguravajuće kompanije, uz korišćenje specijalizovanog alata razvijenog u Microsoft Excel okruženju, koji značajno olakšava i ubrzava njenu primenu. Osnovni preduslov za primenu metode ulančanih lestvica jeste postojanje kvalitetnih i konzistentnih podataka o rešenim ili prijavljenim štetama u prošlosti, razvrstanih po godinama nastanka i godinama razvoja šteta, i grupisanih po homogenim grupama rizika. Od kvaliteta ovih podataka zavisi realnost ocene koeficijenata razvoja šteta u prošlosti i, samim tim, iznosa šteta koje će biti rešene (prijavljene) u budućnosti.

2. POTREBA ZA OBRAČUNOM REZERVACIJA ZA ŠTETE

Regulatorni okvir Solventnost II, koji se primenjuje u zemljama članicama Evropske unije, objedinjuje u okviru prvog stuba posvećenog kvantitativnim zahtevima tri činioca adekvatnosti kapitala osiguravača: formiranje i obračun tehničkih rezervi, zahteve za minimalnim i solventnosnim kapitalom i pravila investiranja. Tehničke rezerve u neživotnom osiguranju obuhvataju: rezerve za prenosne premije, rezerve za neistekle rizike, rezervacije za štete i dr. Metodom *pro rata temporis* utvrđuje se iznos prenosne premije koji proporcionalno odgovara vremenskom periodu trajanja ugovora o osiguranju nakon datuma obračuna. Ukoliko test adekvatnosti obaveza (*Liability Adequacy Test* – LAT) pokaže nedovoljnost rezervi za prenosne premije, obračunavaju se rezerve za neistekle rizike po propisanoj metodi za njihov obračun (Kočović & Koprivica, 2018). Međutim, problem adekvatnosti tehničkih rezervi može nastupiti prilikom obračuna rezervacija za štete, budući da one predstavljaju procenjene vrednosti obaveza osiguravača za neisplaćene odštetne zahteve na dan obračuna, a ne tačno izračunate vrednosti.

Razlozi za procenu rezervacija za štete su vremensko nepodudaranje trenutka nastanka štete, njene prijave osiguravaču, i vremena kada su procenjene veličine odštetnih zahteva, koji još uvek nisu isplaćeni. Ukupne rezervacije za štete obuhvataju dve kategorije: rezervacije za nastale prijavljene, a nerešene štete i rezervacije za nastale neprijavljene štete.

Rezervacije za nastale prijavljene a nerešene štete (*Reported but not Settled* – RBNS) predstavljaju procenjeni iznos koji je potreban za buduće isplate odštetnih zahteva, koji su prijavljeni osiguravaču, kao i za pokriće reaktiviranih odštetnih zahteva. Rezervacije za nastale neprijavljene štete (*Incurred but not Reported* – IBNR) su procenjeni iznos obaveza za štete koji su nastale, ali koje još uvek nisu prijavljene, a pored toga u praksi ove rezervacije obuhvataju i buduće promene u procenjenim veličinama poznatih odštetnih zahteva i rezerve za neevidentirane odštetne zahteve (Brown & Gottlieb, 2001).

Osnov za određivanje rezervacija za nastale neprijavljene štete je proučavanje dinamike promena u štetama kroz vreme. Da bi se sprovela procena IBNR rezervacija metodom ulančanih lestvica, neophodno je da svi podaci o štetama i pripadajućim troškovima likvidacije šteta budu sistematično grupisani prema datumu nastanka štetnog događaja i datumu rešavanja ili prijave štete. Posebno vredan izvor informacija za ocenu IBNR rezervacija predstavljaju podaci o štetama koje su nastale u prethodnim periodima, a koje su prijavljene i rešene tokom obračunskog perioda.

Aktuarske metode koje se koriste za utvrđivanje rezervacija za štete su pouzdane u meri u kojoj su pouzdani podaci u odnosu na koje se primenjuju. Stoga je veoma važno da se relevantni podaci prikupljaju na konzistentnoj osnovi, uz detaljnu proveru i kontrolu njihove tačnosti. Premisa uspešne implementacije metode ulančanih lestvica jeste postojanje kvalitetno dizajnirane baze podataka, koja mora biti strukturirana tako da podrži detaljnu analizu i agregaciju podataka o prijavljenim štetama, njihovim isplatama i razvojnim periodima. Ključni elementi ove baze uključuju tabele koje sadrže informacije o prijavljenim štetama (datum nastanka, datum prijave, vrsta osiguranja, status, iznosi), evidenciju pojedinačnih isplata (datum, iznos, povezane štete), kao i dimenzionalne tabele koje omogućavaju konstrukciju trouglova razvoja šteta po osovinama perioda nastanka i razvojnih perioda. Standardizovana struktura baze podataka omogućava sistematično praćenje dinamike šteta, preciznu izgradnju trouglova razvoja šteta i automatizovano izvođenje projekcija uz punu kontrolu nad tačnošću i doslednošću ulaznih podataka (Antonio & Plat, 2014).

Ipak, praksa pokazuje da podaci o štetama gotovo uvek sadrže određeni nivo slučajnih varijacija, mogu biti pod uticajem velikih i katastrofalnih šteta, grešaka u obradi ili promena u postupcima rešavanja šteta. Uz to, obrasci razvoja šteta iz prošlosti ne moraju biti reprezentativni za buduće periode zbog promena u poslovnoj politici osiguravača, zakonskoj regulativi, stopi inflacije ili samoj prirodi rizika. Upravo zato, primena

DRAFT VERZIJA

aktuarskih metoda poput *Chain-Ladder* metode zahteva ne samo kvalitetnu bazu podataka, već i oprez u pogledu validnosti aktuarskih pretpostavki, ali i subjektivno rasuđivanje aktuara na bazi njegovog iskustva i ekspertize.

3. TEORIJSKE OSNOVE METODE ULANČANIH LESTVICA

Neka slučajna promenljiva $S_{i,j}$ predstavlja iznos šteta koje su nastale u i-tom periodu ($i = 1, \dots, I$) i rešene (prijavljene) su u j-tom periodu ($j = 1, \dots, I$). Poznati iznosi ovih šteta za periode $i + j \leq I + 1$ obrazuju trougao inkrementalnih šteta (Tabela 1). Njihovim sumiranjem po periodima razvoja dobija se trougao kumulativnih šteta (Tabela 2). Slučajna promenljiva $C_{i,j}$ predstavlja iznos šteta koje su nastale u i-tom periodu, a rešene (prijavljene) su do kraja j-tog perioda.

Tabela 1: Opšta forma trougla inkrementalnih šteta

Period nastanka	**Period razvoja**						
	1	**2**	**...**	j	**...**	$I-1$	I
1	$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	...	$S_{1,j}$	...	$S_{1,I-1}$	$S_{1,I}$
2	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	...	$S_{2,j}$	...	$S_{2,I-1}$	
...	...	...	...	...	...		
i	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$	...	$S_{i,j}$			
...	...	...	...				
$I-1$	$S_{I-1,1}$	$S_{I-1,2}$					
I	$S_{I,1}$						

Tabela 2: Opšta forma trougla kumulativnih šteta

Period nastanka	**Period razvoja**						
	1	**2**	**...**	j	**...**	$I-1$	I
1	$C_{1,1}$	$C_{1,2}$	...	$C_{1,j}$	...	$C_{1,I-1}$	$C_{1,I}$
2	$C_{2,1}$	$C_{2,2}$	...	$C_{2,j}$	...	$C_{2,I-1}$	
...	...	...	...	...	...		
i	$C_{i,1}$	$C_{i,2}$	...	$C_{i,j}$			
...	...	...	...				
$I-1$	$C_{I-1,1}$	$C_{I-1,2}$					
I	$C_{I,1}$						

Svaki red u trouglu kumulativnih šteta prikazuje kako se razvija određena grupa šteta od njihovog nastanka do konačnog iznosa. Primenom metode ulančanih lestvica, ocenjuju se iznosi šteta koje će biti rešene (prijavljene) u narednim periodima kako bi raspoloživi trougao šteta bio proširen u pravougaonu formu (Taylor, 2000). Prvi korak u primeni metode je ocena faktora razvoja šteta f_j, kojima se opisuje prirast kumulativnog iznosa šteta između uzastopnih perioda razvoja. Ova ocena može biti zasnovana na prostoj ili ponderisanoj aritmetičkoj sredini istorijskih individualnih faktora razvoja $f_{m,j} = C_{m,j+1}/C_{m,j}$, $1 \leq m \leq I\text{-}j$, uzimajući u obzir sve individualne faktore (sa ili bez njihovih ekstremnih vrednosti), ili individualne faktore za najviše tri do pet poslednjih perioda (Jovović, 2015).

Konačan iznos šteta koje potiču iz i-tog perioda nastanka $C_{i,I}$ ocenjuje se na osnovu njihovog kumulativnog iznosa zaključno sa tekućim kalendarskim periodom $C_{i,I+1-i}$ i ocenjenih faktora razvoja:

$$\hat{C}_{i,I} = C_{i,I+1-i} \cdot \hat{f}_{I+1-i} \cdot \ldots \cdot \hat{f}_{I-1}, 2 \leq i \leq I, \tag{1}$$

dok je ocena rezervacija za štete koje su nastale u i-tom periodu R_i jednaka:

$$\hat{R}_i = \hat{C}_{i,I} - C_{i,I+1-i}, 2 \leq i \leq I. \tag{2}$$

Ukoliko se koriste podaci o rešenim štetama, rezultat primene *Chain-Ladder* metode su ukupne rezervacije za štete. Korišćenjem podataka o prijavljenim štetama, sa druge strane, direktno se ocenjuju rezervacije za nastale, ali neprijavljene štete. Prednosti korišćenja podataka o rešenim štetama su njihova objektivnost, proverljivost i usklađenost sa računovodstvenom evidencijom. Ipak, trouglovi u kojima se razvoj šteta prati po perioda rešavanja obično imaju duži rep, jer ne uključuju sve informacije o štetama koje osiguravač poseduje (tj. informacije o štetama koje su prijavljene, ali nisu rešene). Osim toga, njihova pouzdanost može biti narušena u slučajevima kada dolazi do značajnih oscilacija u tempu rešavanja šteta tokom vremena (Taylor, 2000). Podaci koji se odnose na prijavljene štete, sa druge strane, uključuju i element subjektivne procene, s obzirom na prisustvo rezervacija za štete koje su prijavljene, ali još nisu rešene. Takvi trouglovi razvoja su kraći, ali njihova upotrebljivost zavisi od stabilnosti ne samo rešavanja, već i prijavljivanja šteta, kao i od konzistentnosti u načinu formiranja RBNS rezervacija tokom vremena (Institute and Faculty of Actuaries, 1997).

4. PRIMENA METODE ULANČANIH LESTVICA UZ UPOTREBU EXCEL ALATA

Primenu metode ulančanih lestvica uz upotrebu namenski razvijenog Excel alata prikazujemo na realnim podacima konkretne osiguravajuće kompanije. Podaci se odnose na godišnje novčane iznose rešenih šteta u osiguranju od autoodgovornosti tokom peroda 2011-2024. godine. Na osnovu trougla inkrementalnih iznosa šteta (Slika 1), potrebno je oceniti rezervacije za nastale neprijavljene štete krajem 2024. godine.

DRAFT VERZIJA

Incremental data

Accident year		development period													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2011	1	122,188	71,035	1,342	12,831	0	247	0	15,548	0	0	0	0	0	0
2012	2	202,864	158,252	25,797	6,969	79,148	6,132	0	0	0	0	0	0	0	
2013	3	197,689	111,784	38,572	0	5,000	0	0	0	0	0	0	0		
2014	4	196,638	39,398	2,980	191	145	0	0	0	0	0	0			
2015	5	282,176	83,430	22,077	15,244	14,653	0	0	0	0	21,408				
2016	6	519,986	122,130	60,626	32,220	0	4,854	0	0	0					
2017	7	676,372	172,672	103,171	52,939	13,480	14,354	0	0						
2018	8	662,542	175,546	47,364	29,896	19,519	42,367	18,054							
2019	9	1,026,598	251,797	81,512	49,694	14,064	24,501								
2020	10	859,300	189,061	128,506	71,010	16,334									
2021	11	1,259,598	489,454	107,066	95,257										
2022	12	1,285,713	440,915	91,011											
2023	13	1,530,357	692,226												
2024	14	1,635,931													

Slika 1: Trougao inkrementalnih šteta (u novčanim jedinicama)

Cumulative data

Accident year		development period													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2011	1	122,188	193,223	194,565	207,396	207,396	207,643	207,643	223,191	223,191	223,191	223,191	223,191	223,191	223,191
2012	2	202,864	361,115	386,913	393,882	473,030	479,162	479,162	479,162	479,162	479,162	479,162	479,162	479,162	
2013	3	197,689	309,473	348,045	348,045	353,045	353,045	353,045	353,045	353,045	353,045	353,045	353,045		
2014	4	196,638	236,036	239,015	239,206	239,351	239,351	239,351	239,351	239,351	239,351	239,351			
2015	5	282,176	365,606	387,683	402,928	417,581	417,581	417,581	417,581	417,581	438,989				
2016	6	519,986	642,115	702,741	734,961	734,961	739,816	739,816	739,816	739,816					
2017	7	676,372	849,044	952,215	1,005,155	1,018,635	1,032,989	1,032,989	1,032,989						
2018	8	662,542	838,088	885,451	915,347	934,867	977,234	995,288							
2019	9	1,026,598	1,278,396	1,359,908	1,409,602	1,423,665	1,448,166								
2020	10	859,300	1,048,360	1,176,866	1,247,877	1,264,211									
2021	11	1,259,598	1,749,052	1,856,118	1,951,375										
2022	12	1,285,713	1,726,628	1,817,639											
2023	13	1,530,357	2,222,583												
2024	14	1,635,931													

Slika 2: Trougao kumulativnih šteta (u novčanim jedinicama)

Na osnovu unetih podataka, Excel alat automatski generiše trougao kumulativnih iznosa šteta (Slika 2), i izračunava istorijske individualne faktore razvoja (Slika 3).

Development factors

Accident year		development period											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2011	1	1.581	1.007	1.066	1.000	1.001	1.000	1.075	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2012	2	1.780	1.071	1.018	1.201	1.013	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
2013	3	1.565	1.125	1.000	1.014	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000		
2014	4	1.200	1.013	1.001	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000			
2015	5	1.296	1.060	1.039	1.036	1.000	1.000	1.000	1.000	1.051				
2016	6	1.235	1.094	1.046	1.000	1.007	1.000	1.000	1.000					
2017	7	1.255	1.122	1.056	1.013	1.014	1.000	1.000						
2018	8	1.265	1.057	1.034	1.021	1.045	1.018							
2019	9	1.245	1.064	1.037	1.010	1.017								
2020	10	1.220	1.123	1.060	1.013									
2021	11	1.389	1.061	1.051										
2022	12	1.343	1.053											
2023	13	1.452												

Slika 3: Istorijski individualni faktori razvoja

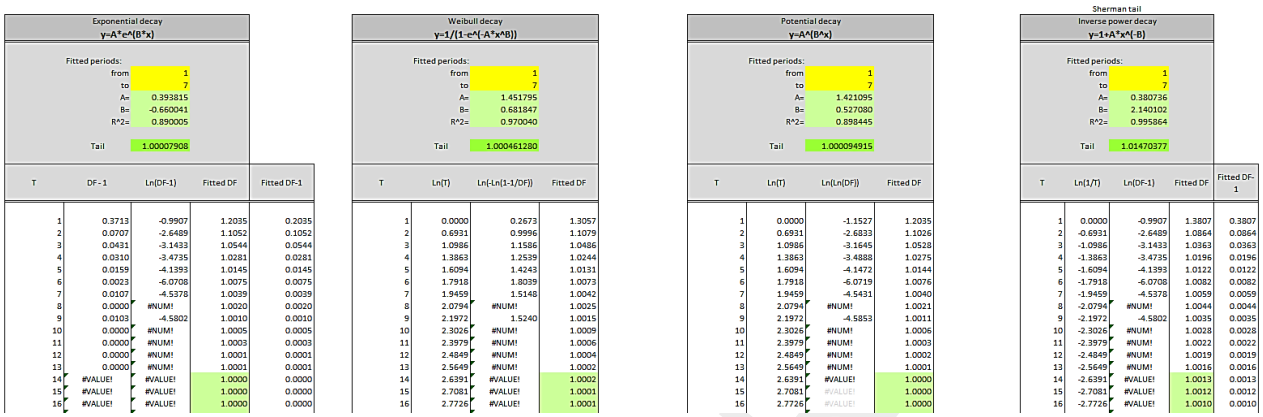
Omogućen je izbor između više načina ocenjivanja faktora razvoja, pri čemu je svakom od njih dodeljen odgovarajući broj (1-8). Unošenjem tog broja u predviđeno polje od strane korisnika, automatski se primenjuje željeni način ocenjivanja faktora razvoja. Na primer, unos vrednosti 1 aktivira obračun na osnovu proste aritmetičke sredine, dok vrednost 2 podrazumeva primenu ponderisane aritmetičke sredine individualnih faktora razvoja. Na osnovu izabranog načina ocenjivanja faktora razvoja, automatski se izračunava proizvod njihovih ocenjenih vrednosti, koji je potreban za ocenu konačnog iznosa šteta po godinama nastanka. Ova veličina pokazuje koliko puta će se iznos šteta koji je rešen do kraja tekućeg obračunskog perioda (tj. zaključno sa 2024. godinom) uvećati dok se te štete u potpunosti ne razviju. Pored toga, prikazana je i recipročna vrednost ovog proizvoda, koja predstavlja procenat već rešenih šteta od ukupno očekivanih šteta za datu godinu nastanka (Slika 4).

	Method		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Tail factor 13
1	Simple average		1.371	1.071	1.037	1.031	1.011	1.002	1.011	1.000	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000	
2	Weighted average		1.340	1.074	1.043	1.024	1.016	1.004	1.004	1.000	1.013	1.000	1.000	1.000	1.000	
3	Weighted average (# of periods)		1.320	1.076	1.043	1.024	1.016	1.004	1.004	1.000	1.013	1.000	1.000	1.000	1.000	
4	Weighted average (# of periods)		1.402	1.057	1.055	1.011	1.028	1.009	1.000	1.000	1.033	1.000	1.000	1.000	1.000	
5	Min		1.200	1.007	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
6	Max		1.780	1.125	1.066	1.201	1.045	1.018	1.075	1.000	1.051	1.000	1.000	1.000	1.000	
7	Excluding min/max		1.350	1.072	1.038	1.014	1.007	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
8	User				1.043		1.016									1.01470
	Method selection (1-8) >>>	1	1.371	1.071	1.043	1.031	1.016	1.00231	1.01070	1.00000	1.010	1.000	1.000	1.000	1.000	1.015
	LDF		1.666	1.215	1.135	1.088	1.055	1.038	1.036	1.025	1.025	1.015	1.015	1.015	1.015	1.015
	1/LDF		60.0%	82.3%	88.1%	91.9%	94.8%	96.3%	96.5%	97.6%	97.6%	98.6%	98.6%	98.6%	98.6%	98.6%

Slika 4: Ocenjeni faktori razvoja

Excel alat takođe daje ocenu repnog faktora (*Tail factor*), koji je posebno važan kod vrsta osiguranja sa tzv. „dugim repom“ (kao što je osiguranje od autoodgovornosti), kod kojih od nastanka štete do njenog konačnog rešavanja može proteći nekoliko godina, pa čak i decenija. Metoda ulančanih lestvica u svojoj standardnoj formi pretpostavlja da je razvoj šteta iz najranije godine nastanka završen u poslednjoj obuhvaćenoj godini razvoja. Ako ta pretpostavka nije ispunjena, može doći do potcenjenosti rezervacija za štete, pa je potrebno oceniti repni faktor, kojim se zatim uvećava procenjeni konačni iznos šteta po svakoj od godina nastanka. Za

ocenjivanje repnog faktora, ovaj Excel alat koristi metod ekstrapolacije teorijskog oblika krive koja se, u najboljoj mogućoj meri, prilagođava prethodno ocenjenim faktorima razvoja (Boor, 2006). Broj dodatnih godina razvoja za koje se vrši ekstrapolacija određuje se tako da faktori razvoja postepeno konvergiraju ka vrednosti jedan. Repni faktor se ocenjuje u vidu proizvoda ekstrapoliranih faktora razvoja (Kočović & Koprivica, 2021). Njime se aproksimira obrazac razvoja šteta nakon poslednjeg ocenjenog faktora razvoja čija se vrednost može smatrati pouzdanom. U posmatranom primeru, ocenjenim faktorima razvoja za prvih sedam godina razvoja prilagođene su funkcija eksponencijalnog trenda, *Weibull*-ova funkcija, stepena funkcija i *Sherman*-ova funkcija. Izbor najadekvatnije funkcije izvršen je na osnovu koeficijenta determinacije (R^2), čija je najveća vrednost ostvarena u slučaju *Sherman*-ove funkcije (Slika 5).



Exponential decay
y=A*e^(B*x)

Fitted periods: from 1, to 7
A= 0.393815
B= -0.660041
R^2= 0.890005
Tail 1.00007908

T	DF-1	Ln(DF-1)	Fitted DF	Fitted DF-1
1	0.3713	-0.9907	1.2035	0.2035
2	0.0707	-2.6489	1.1052	0.1052
3	0.0431	-3.1433	1.0544	0.0544
4	0.0310	-3.4735	1.0281	0.0281
5	0.0159	-4.1393	1.0145	0.0145
6	0.0023	-6.0708	1.0075	0.0075
7	0.0107	-4.5378	1.0039	0.0039
8	0.0000	#NUM!	1.0020	0.0020
9	0.0103	-4.5802	1.0010	0.0010
10	0.0000	#NUM!	1.0005	0.0005
11	0.0000	#NUM!	1.0003	0.0003
12	0.0000	#NUM!	1.0001	0.0001
13	0.0000	#NUM!	1.0001	0.0001
14	#VALUE!	#VALUE!	1.0000	0.0000
15	#VALUE!	#VALUE!	1.0000	0.0000
16	#VALUE!	#VALUE!	1.0000	0.0000

Weibull decay
y=1/(1-e^(-A*x^B))

Fitted periods: from 1, to 7
A= 1.451795
B= 0.681847
R^2= 0.970040
Tail 1.000461280

T	Ln(T)	Ln(-Ln(1-1/DF))	Fitted DF
1	0.0000	0.2673	1.3057
2	0.6931	0.9996	1.1079
3	1.0986	1.1586	1.0486
4	1.3863	1.2539	1.0244
5	1.6094	1.4243	1.0131
6	1.7918	1.8039	1.0073
7	1.9459	1.5148	1.0042
8	2.0794	#NUM!	1.0025
9	2.1972	1.5240	1.0015
10	2.3026	#NUM!	1.0009
11	2.3979	#NUM!	1.0006
12	2.4849	#NUM!	1.0004
13	2.5649	#NUM!	1.0002
14	2.6391	#VALUE!	1.0002
15	2.7081	#VALUE!	1.0001
16	2.7726	#VALUE!	1.0001

Potential decay
y=A^(B*x)

Fitted periods: from 1, to 7
A= 1.421095
B= 0.527080
R^2= 0.898445
Tail 1.000094915

T	Ln(T)	Ln(Ln(DF))	Fitted DF
1	0.0000	-1.1527	1.2035
2	0.6931	-2.6833	1.1026
3	1.0986	-3.1645	1.0528
4	1.3863	-3.4888	1.0275
5	1.6094	-4.1472	1.0144
6	1.7918	-6.0719	1.0076
7	1.9459	-4.5431	1.0040
8	2.0794	#NUM!	1.0021
9	2.1972	-4.5853	1.0011
10	2.3026	#NUM!	1.0006
11	2.3979	#NUM!	1.0003
12	2.4849	#NUM!	1.0002
13	2.5649	#NUM!	1.0001
14	2.6391	#VALUE!	1.0000
15	2.7081	#VALUE!	1.0000
16	2.7726	#VALUE!	1.0000

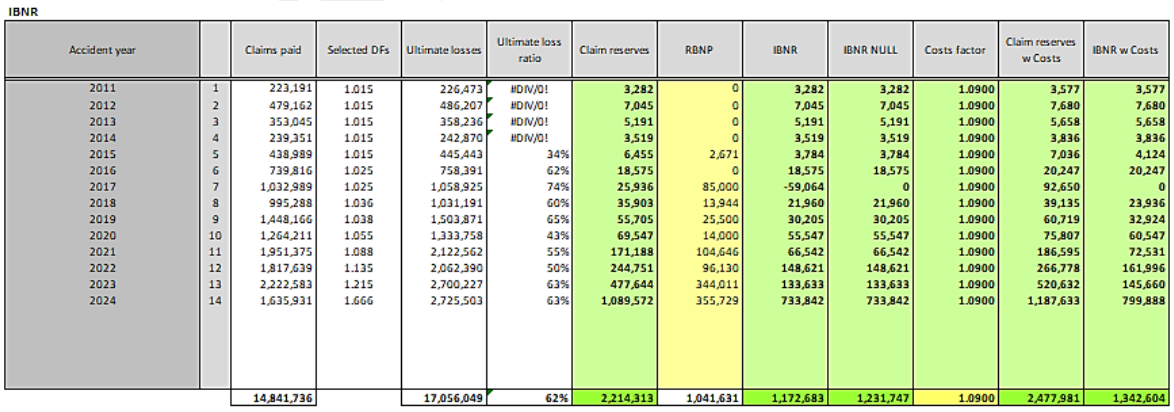
Sherman tail
Inverse power decay
y=1+A*x^(-B)

Fitted periods: from 1, to 7
A= 0.380736
B= 2.140102
R^2= 0.995864
Tail 1.01470377

T	Ln(1/T)	Ln(DF-1)	Fitted DF	Fitted DF-1
1	0.0000	-0.9907	1.3807	0.3807
2	-0.6931	-2.6489	1.0864	0.0864
3	-1.0986	-3.1433	1.0363	0.0363
4	-1.3863	-3.4735	1.0196	0.0196
5	-1.6094	-4.1393	1.0122	0.0122
6	-1.7918	-6.0708	1.0082	0.0082
7	-1.9459	-4.5378	1.0059	0.0059
8	-2.0794	#NUM!	1.0044	0.0044
9	-2.1972	-4.5802	1.0035	0.0035
10	-2.3026	#NUM!	1.0028	0.0028
11	-2.3979	#NUM!	1.0022	0.0022
12	-2.4849	#NUM!	1.0019	0.0019
13	-2.5649	#NUM!	1.0016	0.0016
14	-2.6391	#VALUE!	1.0013	0.0013
15	-2.7081	#VALUE!	1.0012	0.0012
16	-2.7726	#VALUE!	1.0010	0.0010

Slika 5: Rezultati ocenjivanja repnog faktora ekstrapolacijom teorijskog oblika krive

Na Slici 6. prikazani su rezultati obračuna rezervacija za štete po svakoj godini nastanka šteta, kao i u zbirnom iznosu. Podaci o štetama rešenim zaključno sa tekućim periodom preuzeti su iz trougla kumulativnih šteta, a njihovim množenjem sa odgovarajućim proizvodom ocenjenih faktora razvoja (uključujući repni faktor) dobijena je ocena konačnog iznosa šteta po godinama nastanka, prema obrascu (1). Ukupne rezervacije za štete su izračunate kao razlika između ocenjenog konačnog iznosa šteta i iznosa šteta koje su već rešene, prema obrascu (2). Njihovim umanjenjem za rezervacije za štete koje su prijavljene ali nisu rešene (RBNS) dobijene su rezervacije za nastale neprijavljene štete (IBNR). Ukoliko je dobijeni iznos IBNR rezervacija za neku od godina nastanka šteta negativan, automatski se izjednačava sa nulom. U završnom koraku, iznos IBNR rezervacija se uvećava za troškove rešavanja šteta. U posmatranom primeru, dobijene su ukupne rezervacije za štete u iznosu od 2.214.313 novčanih jedinica, od čega se 1.041.631 novčanih jedinica odnosi na rezervacije za nastale ali nerešene štete. Ostatak od 1.172.683 novčanih jedinica odnosi se na rezervacije za nastale neprijavljene štete. Nakon izjednačavanja negativne vrednosti IBNR rezervacija sa nulom za jednu od godina nastanka šteta, dobijen je ukupan iznos IBNR rezervacija od 1.231.747 novčanih jedinica.



IBNR

Accident year		Claims paid	Selected DFs	Ultimate losses	Ultimate loss ratio	Claim reserves	RBNP	IBNR	IBNR NULL	Costs factor	Claim reserves w Costs	IBNR w Costs
2011	1	223,191	1.015	226,473	#DIV/0!	3,282	0	3,282	3,282	1.0900	3,577	3,577
2012	2	479,162	1.015	486,207	#DIV/0!	7,045	0	7,045	7,045	1.0900	7,680	7,680
2013	3	353,045	1.015	358,236	#DIV/0!	5,191	0	5,191	5,191	1.0900	5,658	5,658
2014	4	239,351	1.015	242,870	#DIV/0!	3,519	0	3,519	3,519	1.0900	3,836	3,836
2015	5	438,989	1.015	445,443	34%	6,455	2,671	3,784	3,784	1.0900	7,036	4,124
2016	6	739,816	1.025	758,391	62%	18,575	0	18,575	18,575	1.0900	20,247	20,247
2017	7	1,032,989	1.025	1,058,925	74%	25,936	85,000	-59,064	0	1.0900	92,650	0
2018	8	995,288	1.036	1,031,191	60%	35,903	13,944	21,960	21,960	1.0900	39,135	23,936
2019	9	1,448,166	1.038	1,503,871	65%	55,705	25,500	30,205	30,205	1.0900	60,719	32,924
2020	10	1,264,211	1.055	1,333,758	43%	69,547	14,000	55,547	55,547	1.0900	75,807	60,547
2021	11	1,951,375	1.088	2,122,562	55%	171,188	104,646	66,542	66,542	1.0900	186,595	72,531
2022	12	1,817,639	1.135	2,062,390	50%	244,751	96,130	148,621	148,621	1.0900	266,778	161,996
2023	13	2,222,583	1.215	2,700,227	63%	477,644	344,011	133,633	133,633	1.0900	520,632	145,660
2024	14	1,635,931	1.666	2,725,503	63%	1,089,572	355,729	733,842	733,842	1.0900	1,187,633	799,888
		14,841,736		17,056,049	62%	2,214,313	1,041,631	1,172,683	1,231,747	1.0900	2,477,981	1,342,604

Slika 6: Rezultati obračuna rezervacija za štete metodom ulančanih lestvica (u novčanim jedinicama)

Izmenom ulaznih podataka ili načina ocenjivanja faktora razvoja, Excel alat automatski preračunava sve relevantne veličine – od trougla kumulativnih šteta, preko repnog faktora i ocenjenog konačnog iznosa šteta, , do iznosa IBNR rezervacija. Ovakav alat značajno ubrzava i olakšava proces primene metode ulančanih lestvica, eliminišući potrebu za ručnim izračunavanjem i omogućavajući korisniku da brzo sagleda uticaj različitih pretpostavki na rezultate. Pored toga, alat doprinosi većoj transparentnosti procesa rezervisanja i

preciznosti dobijenih rezultata, te omogućava aktuarima da efikasno sprovedu analize senzitiviteta i bolje razumeju dinamiku rezervacija u uslovima promenljivih podataka i parametara.

5. ZAKLJUČAK

Robusna evaluacija rezervacija za štete u skladu sa zahtevima Direktive Solventnost II predstavlja jedan od najozbiljnjih izazova sa kojima se danas suočavaju osiguravajuće kompanije. U radu je prikazan doprinos korišćenja namenski razvijenog Excel alata efikasnoj primeni metode ulančanih lestvica i preciznosti obračuna, odnosno procene rezervacija za štete. Upotreba jednostavnog, ali funkcionalnog Excel alata značajno ubrzava proces rezervisanja, eliminiše rizik od računskih grešaka i omogućava sprovođenje analiza senzitiviteta u realnom vremenu

Savremeni alati koji integrišu klasične aktuarske metode sa mogućnostima automatske obrade i fleksibilne primene, predstavljaju važan korak ka modernizaciji procesa rezervisanja i unapređenju finansijske otpornosti osiguravača. Ipak, treba imati u vidu da kvalitetna baza podataka predstavlja neophodnu premisu za uspešnu primenu metode ulančanih lestvica u proceni rezervacija za štete. Njena uloga ne podrazumeva puko skladištenje podataka, već standardizaciju, transparentnost, tačnost i ponovljivost aktuarskih analiza. Uslovi za tačnost automatizovanog izvođenja projekcija budućih isplata šteta i preciznost procene rezervacija za štete na dan obračuna su puna kontrola nad tačnošću i doslednošću ulaznih podataka, definisanje adekvatnih aktuarskih pretpostavki pri primeni metoda rezervisanja i posedovanje neophodnih ekspertskih znanja aktuara koji vrši obračun. Bez ispunjenosti ovih uslova, primena naprednih softverskih alata ne može dati pouzdane rezultate, niti ispuniti regulatorne zahteve u savremenom okruženju poslovanja osiguravajućih kompanija.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje dobilo je finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

LITERATURA

Antonio, K., & Plat, R. (2014). Micro-Level Stochastic Loss Reserving for General Insurance. *Scandinavian Actuarial Journal, 2014*(7), 649-669.

Boor, J. (2006). Estimating Tail Development Factors: What to do When the Triangle Runs Out. *CAS Forum Winter.* Arlington: Casualty Actuarial Society, 345-390.

Brown, R. L., & Gottlieb, L. R. (2001). *Introduction to Ratemaking and Loss Reserving for Property and Casualty Insurance* (2nd ed.). Winsted, CT: ACTEX Publications.

Institute and Faculty of Actuaries (1997). *Claims Reserving Manual,* Vol. 1, Edinburgh: Institute and Faculty of Actuaries.

Jovović, M. (2015). Merenje rizika pri utvrđivanju solventnosti neživotnih osiguravača. *Doktorska disertacija.* Beograd: Univerzitet u Beogradu - Ekonomski fakultet.

Kočović, J., & Koprivica, M. (2018). Measuring adequacy of unearned premium reserve. *XLV Simpozijum o operacionim istraživanjima SYM-OP-IS 2018,* Proceedings, 271-277. http://www.symopis2023.mod.gov.rs/download/istorijat/XLV_Simpozijum_o_operacionim_istrazivanjima.pdf

Kočović, J., & Koprivica, M. (2021). Ocena repnog faktora razvoja šteta ekstrapolacijom teorijskog oblika krive. *XLVIII Simpozijum o operacionim istraživanjima SYM-OP-IS 2021,* Zbornik radova, 123-128. http://www.symopis2023.mod.gov.rs/download/istorijat/XLVIII_Simpozijum_o_operacionim_istrazivanjima.pdf

Kočović, J., Koprivica, M., & Rakonjac-Antić, T. (2023). Ocena adekvatnosti rezervacija za štete osiguravajuće kompanije za neživotno osiguranje. *50. Simpozijum o operacionim istraživanjima SYM-OP-IS 2023,* Zbornik radova, 971-976. http://www.symopis2023.mod.gov.rs/download/SIM-OP-IS-2023-Zbornik.pdf

Kočović, J., Rajić, V., & Jovović, M. (2012). Prednosti i nedostaci Chain Ladder metoda za procenu rezervi za štete. *XXXIX Simpozijum o operacionim istraživanjima SYM-OP-IS 2012,* Zbornik radova, 4 strane

Taylor, G. (2000). *Loss Reserving: An Actuarial Perspective.* Kluwer Academic Publishers.

DRAFT VERSION

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

ФОН
UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Оригинални чланак

ФИНАНСИЈСКА ИЗДВАЈАЊА ЗА НАБАВКУ ДРОНОВА У СВЕТУ И НА БАЛКАНУ

FINANCIAL ALLOCATIONS FOR DRONE PROCUREMENT IN THE WORLD AND THE BALKANS

САЊА МАРКОВИЋ[1]

[1] Војна академија, Београд, markovicsanja395@yahoo.com

Резиме: *Овај рад анализира буџете и финансијска средства која се издвајају за набавку дронова у земљама света, са фокусом на војну и цивилну употребу. Размотрени су водећи играчи као што су Сједињене Америчке Државе, Кина, Русија и Европска унија, који издвајају милијарде долара за развој и набавку дронова ради јачања безбедности, као и унапређења цивилних сектора попут пољопривреде и логистике. Такође, посебна пажња посвећена је земљама Балкана, које улазе у овај процес у складу са својим стратешким потребама и економским могућностима. Упркос изазовима као што су ограничени буџети и потреба за развојем инфраструктуре, балканске земље показују растуће интересовање за ову технологију, што има потенцијал за значајан економски и безбедносни развој. Циљ рада је да се анализирају обим и структура финансијских издвајања за набавку дронова у свету и на Балкану, са посебним освртом на кључне глобалне актере. Методологија је заснована на секундарним изворима као што су SIPRI, NATO, CRS, и званични државни документи, са фокусом на квалитативну анализу и компаративни приступ. Истраживачко питање гласи: Како се финансијска издвајања за набавку дронова разликују између водећих светских сила и балканских земаља?*

Кључне речи: *дронови, буџети, војна употреба.*

Abstract: *This paper analyzes the budgets and financial resources allocated for drone procurement in countries around the world, focusing on both military and civilian uses. Key players such as the United States, China, Russia, and the European Union are examined for their significant investments in drone development and procurement to enhance security and improve sectors like agriculture and logistics. Special attention is given to the Balkan countries, which are entering this process based on their strategic needs and economic capabilities. Despite challenges such as limited budgets and the need for infrastructure development, Balkan nations show a growing interest in this technology, with potential for significant economic and security development. The aim of this paper is to analyze the scope and structure of financial expenditures for drone procurement globally and in the Balkans, with particular emphasis on key global actors. The methodology is based on secondary sources such as SIPRI, NATO, CRS, and official government documents, with a focus on qualitative analysis and a comparative approach. The research question is: How do financial expenditures for drone procurement differ between leading global powers and Balkan countries?*

Keywords: *drones, budgets, military use.*

1. УВОД

Набавка дронова у земљама света постала је важан аспект савремених војних, цивилних и комерцијалних активности. Са напредовањем технологије, дронови су постали не само средства за обављање различитих задатака, већ и кључна компонента у развоју националних и глобалних безбедносних система. У овом контексту, буџети и финансијска средства која се издвајају за набавку дронова изузетно добијају на важности, јер ова технологија захтева значајне инвестиције, како у смислу истраживања и развоја, тако и у смислу набавке и одржавања самих уређаја.

DRAFT VERSION

2. ДРОНОВИ КАО СТРАТЕШКА ИНВЕСТИЦИЈА

Дронови су се развили од једноставних беспилотних летелица за војну употребу до сложених система који се користе у бројним областима, укључујући пољопривреду, науку, заштиту животне средине, транспорт и доставу робе. У већини случајева, највећи интерес за ову технологију долази од војних и безбедносних агенција, али и компаније из приватног сектора виде потенцијал у дроновима за побољшање својих пословних операција.

За многе земље, набавка дронова није само питање модернизације војних способности, већ и стратешко питање које обухвата аспекте као што су национална безбедност, одбрана, али и економски развој. Дронови могу да обезбеде свеобухватну надзорну и обавештајну подршку, као и брзу доставу помоћи у ванредним ситуацијама.

3. ФИНАНСИЈСКА СРЕДСТВА И БУЏЕТИ ЗА НАБАВКУ ДРОНОВА

Улагања у технологију дронова варирају у зависности од земље и њеног економског стања, али и од војних и цивилних приоритета. Државе са већим војним буџетима, као што су Сједињене Америчке Државе, Кина, Русија, Индија и Израел, развој и набавку напредних дронова сматрају приоритетним активностима.

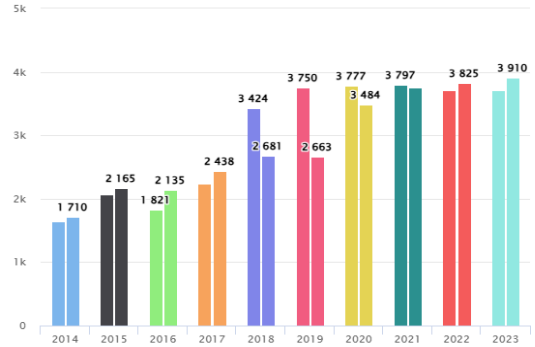
Кина, која се такође сматра једним од највећих играча на овом тржишту, годишње издваја милијарде долара за производњу и набавку дронова. Поред војних апликација, Кина активно ради на развоју цивилних дронова, који се користе у разним индустријама, као што су пољопривреда, логистика и комерцијални надзор.

Земље као што су Саудијска Арабија и Турска такође значајно улажу у развој својих дронских способности, како би повећале своје стратешке капацитете у региону. Саудијска Арабија, на пример, у 2020. години уложила је више од 2 милијарде долара у војне дронове, што показује озбиљан приступ модернизацији војске.

Земља	Година	Буџет за дронове (USD)	Извор
САД	2021	10+ милијарди	SIPRI (2023)
Кина	2020	2+ милијарде	IISS (2023)
Саудијска Арабија	2020	2 милијарде	CRS (2024)
Србија	2023	19,3 милиона	МО Србије (2024)

3.1. Сједињене Америчке Државе

Сједињене Америчке Државе су један од највећих играча на тржишту дронова, и то како у војној тако и у цивилној употреби. У 2021. години, амерички војни буџет за дронове премашио је 10 милијарди долара (SIPRI, 2023). Ова средства укључују развој напредних беспилотних летелица, као што су MQ-9 Reaper, као и одржавање и надоградњу ових система. Поред тога, САД издвајају значајне износе за развој цивилних дронова, укључујући примену у пољопривреди, достави и логистици, а такви пројекти такође примају значајну подршку из различитих државних агенција и програма за иновације.



2014	1649	1710
2015	2066	2165
2016	1821	2135
2017	2245	2438
2018	3424	2681
2019	3750	2663
2020	3777	3484
2021	3797	3754
2022	3706	3825
2023	3711	3910

Слика 1: Процењени глобални и амерички буџет за набавку беспилотних летелица (дронова) од 2014. до 2023. године (Износи су исказани у милионима америчких долара). Извор: StatInvestor (2025).

3.2. Кина

Кина је такође велики инвеститор у технологију дронова. Са растућим војним буџетом и амбицијом да постане светски лидер у области технолошке иновације, Кина улаже више од 2 милијарде долара у развој својих дронова (IISS, 2023). У 2020. години, процењује се да је Кина издвојила више од 2 милијарде долара за развој и набавку дронова. Кинеска војска користи беспилотне летелице за надзор, обавештајне активности, као и за извршење напада у конфликтима. Поред војних примена, Кина такође активно развија цивилне дронове, укључујући дронове за доставу пакета и пољопривредне дронове за обављање прецизних задатака на терену.

3.3. Русија

Русија, као велики играч у глобалном одбрамбеном сектору, такође улаже у развој беспилотних летелица. Њихова употреба дронова у војним операцијама у Сирији и другим конфликтима показала је значај ових система. Русија у последњим годинама из године у годину повећава своја улагања у ову технологију. Процене указују на то да су руски буџети за набавку дронова на годишњем нивоу износили неколико стотина милиона долара. Осим војне примене, Русија такође истражује примену дронова у области надзора и пољопривреде.

3.4. Европска унија и Велика Британија

Европска унија, као и поједине земље чланице, попут Француске и Велике Британије, такође су активни инвеститори у дронске технологије. Европска унија активно ради на развоју правних и техничких стандарда за коришћење дронова у комерцијалне сврхе, укључујући доставу, надзор и пољопривреду. Француска, као лидер у области безбедности и одбране, већ дуги низ година улаже значајне износе у војне дронове, а улагања су се последњих година повећала због сигурносних изазова у Европи. Велика Британија такође издваја значајна средства за развој својих беспилотних летелица, посебно у контексту побољшања својих капацитета за обавештајне активности и оперативне способности.

Категорија	Износ (€ милијарди)	Напомена
Укупни војни буџет	413	Повећање од €100 милијарди у односу на претходни период.
Инвестиције у дронове	5	Обухвата развој беспилотних система и муниције.
Интелигенција и контраобавештајне активности	5	Јачање капацитета за прикупљање и анализу података.
Инвестиције у иновативне технологије	10	Укључује развој ројевских дронова и роботике.

Слика 2: Војна улагања Француске у дронове од 2024. до 2030. Године. Извор: FR Ministry of Armed Forces (2024), према преносу у Cappello (2023).

3.5. Турска и Блиски исток

Турска је постала један од најважнијих произвођача дронова на глобалном нивоу, а нарочито је позната по развоју система као што је Bayraktar. Улагања у ову технологију су се значајно повећала у последњих неколико година. Турска је једна од земаља која активно извоз и развија дронове за своје потребе, као и за потребе других земаља. Такође, земље као што су Саудијска Арабија, Уједињени Арапски Емирати и Египат такође значајно инвестирају у ову технологију, како би побољшале своје стратешке и војне капацитете.

3.6. Земље Балкана

3.6.1. Србија

Србија је једна од земаља на Балкану која активно ради на развоју и набавци дронова, како у војне, тако и у цивилне сврхе. Србија је већ показала значајан интерес за модернизацију својих одбрамбених капацитета, а дронови су постали важан део ове стратегије. Србија је недавно набавила

дронове из Кине, као и развила своје сопствене беспилотне летелице које се користе у различите сврхе, укључујући надзор граница, обавештајне активности и војне операције.

У последњих неколико година, Србија је започела серију пројеката за развој технологија које подразумевају употребу дронова у пољопривреди, заштити животне средине и инфраструктурним пројектима. Поред тога, Србија је посвећена развоју регулаторних оквира који ће омогућити безбедну употребу дронова у цивилне сврхе. Финансијска средства која се издвајају за ове намене долазе углавном из буџета Министарства одбране, као и од стране различитих приватних компанија и европских фондова који подржавају иновације у овом сектору.

Модел	Тип	Намена	Вредност уговора
CH-92A	Борбено-извиђачки	Извиђање и прецизно гађање	19,3 милиона USD

Слика 3: Набавка кинеских дронова. Извор: Министарство одбране Србије (2024).

Година	Намена	Износ (у милионима RSD)
2025	Опремање из домаће одбрамбене индустрије	6.728,4
2025	Изградња нових објеката и инфраструктуре	3.800,0

Слика 4: Буџетска улагања у дронове и одбрамбену индустрију. Извор: Министарство одбране Србије (2024).

3.6.2. Хрватска

Хрватска је такође активан корисник дронова, и то како у војним, тако и у цивилним применама. Хрватска војска користи дронове за надзор, извиђање и обавештајне активности, али и у контексту учешћа у међународним операцијама. Пре неколико година, Хрватска је купила дронове из Израела, који су постали важан део њихових војних способности (Telegraf.rs, 2024).

У цивилној сфери, дронови се користе за мониторинг пољопривредних усева, надзор животне средине и у помоћи при катастрофама. Хрватска је такође започела развој инфраструктуре која ће омогућити широкопојасну употребу дронова у логистици и комерцијалним услугама. Влада је такође усвојила прописе који регулишу лет дронова у цивилним сврхама, те се све више развијају и приватне компаније које нуде услуге дронова.

Финансијска средства која се улажу у ову технологију у Хрватској углавном долазе из државног буџета, али и из Европске уније која пружа значајну подршку за развој технологија и иновација. С обзиром на то да Хрватска активно развија пољопривреду и заштиту животне средине, дронови су кључни за оптимизацију тих процеса.

3.6.3. Босна и Херцеговина

Босна и Херцеговина има ограничена финансијска средства за набавку дронова, али у последњим годинама, ова технологија постаје све популарнија и у цивилним и војним сврхама. Војска Босне и Херцеговине је, као и друге балканске земље, започела процес набавке дронова, пре свега за потребе заштите граница, обавештајне активности и мониторинга безбедности. Такође, ови дронови се користе и у сарадњи са међународним организацијама за одржавање стабилности у региону.

У цивилним секторима, дронови се користе у пољопривреди, географском снимању и праћењу животне средине. Босна и Херцеговина има велики потенцијал за развој пољопривреде уз помоћ дронова, али су ограничена средства и недовољна инфраструктура главни изазови у овом сектору.

Буџети који се издвајају за ову технологију у Босни и Херцеговини су углавном скромни, али постоји потенцијал за привлачење средстава из међународних извора, попут фондова Европске уније, који подржавају иновације и развој технологија на Балкану.

3.6.4. Северна Македонија

Северна Македонија, као и друге балканске земље, настоји да модернизује своје војне и цивилне капацитете, а дронови играју значајну улогу у овом процесу. Македонска војска је у протеклим годинама набавила одређени број дронова за потребе извиђања и надзора, а земља такође разматра могућности за примену дронова у полицијским активностима.

Северна Македонија, као земља кандидат за чланство у Европској унији, добија значајну подршку од европских фондација које финансирају иновације и развој нових технологија. Дронови се све више користе у пољопривреди, а неке локалне компаније већ користе дронове за мониторинг усева, као и за обављање прецизних агрономских анализа.

3.6.5. Албанија

Албанија је земља која се све више окреће иновацијама, а дронови постају део њихових стратегија за развој пољопривреде и побољшање инфраструктуре. Албанска влада је започела сарадњу са различитим међународним партнерима у циљу развоја технологија које укључују дронове, нарочито у секторима као што су мониторинг животне средине и агрономија.

Вођена стратегијом модернизације војних капацитета, Албанија је почела да увози дронове за војне и безбедносне потребе. Међутим, као и друге земље на Балкану, Албанија се суочава са ограниченим буџетима и потребом за већим улагањима у инфраструктуру и развој ове технологије.

3.6.6. Црна Гора

Црна Гора, иако мања земља, показује интересовање за употребу дронова, пре свега у циљу побољшања безбедности и националне одбране. Набавка дронова за потребе безбедносних снага постала је приоритет у последњим годинама. Такође, дронови се користе и у цивилним секторима као што су пољопривреда, екологија и туризам, с обзиром на природне лепоте Црне Горе које су идеалне за употребу дронова у промоцији туризма.

Црна Гора је у претходним годинама добила средства од Европске уније и других међународних партнера за развој ових технологија, а очекује се да ће дронови играти значајну улогу у будућем економском развоју земље.

4. ПРОБЛЕМИ И ИЗАЗОВИ

Иако су дронови постали кључна компонента модерне технологије, набавка ових система није без изазова. Поред великог финансијског оптерећења, земље се суочавају са различитим безбедносним, етичким и правним питањима. Проблеми као што су сигурност података, ризици од хаковања и злоупотреба дронова су кључна питања која државе морају узети у обзир при набавци и коришћењу ове технологије.

Додатно, геополитички аспекти, као што су забринутости за војну надмоћ и глобална трка у наоружању, такође утичу на финансијске одлуке. Многе земље осећају потребу да улажу у дронове не само као алат за побољшање безбедности, већ и као начин да се одржи конкурентност на глобалном нивоу. Иако недостају комплетни и упоредиви подаци за све земље, из приказаних издвајања могу се уочити трендови и диспропорције у буџетским могућностима, што указује на ограничене потенцијале балканских земаља у поређењу са водећим глобалним актерима.

5. ЗАКЉУЧАК

Истраживање финансијских издвајања за набавку борбених дронова у различитим деловима света указује на неоспорив значај ове технологије у савременом безбедносном, али и економском и цивилном контексту. Главне предности истраживања огледају се у свеобухватној анализи глобалних трендова у буџетирању дронске технологије, идентификовању кључних актера као што су САД, Кина, Русија и земље Европске уније, као и у истраживању позиције земаља Балкана, које тек започињу систематско улагање у овај домен. Рад указује на чињеницу да су дронови постали не само стратешко оружје, већ и алат за економски напредак, што их сврстава у категорију вишенаменских технолошких улагања од националног интереса.

Међутим, недостатак транспарентних и актуелних података о буџетима неких земаља, посебно оних које своје улагање у ову технологију сматрају поверљивим, представља једну од кључних препрека за потпуну анализу. Осим тога, компаративна анализа између земаља није увек могућа због различитих економских модела и критеријума буџетског планирања.

Резултати рада, пре свега, могу служити као основа за доношење стратешких одлука у војним и безбедносним структурама, али и за креирање националних програма за развој домаће индустрије дронова. Такође, могу бити корисни доносиоцима одлука у процесу планирања буџета и процене исплативости инвестиција у технолошки развој. За мање развијене земље, нарочито у региону

DRAFT VERZIJA

Балкана, ови подаци могу послужити као смернице за постепено и рационално увођење дронске технологије у складу са реалним могућностима и приоритетима.

Сумирајући, иако истраживање има методолошка ограничења, оно пружа значајан увид у глобалну слику финансирања дронова и основу за стратешко планирање и упоређивање улагања у дронске технологије, са посебним освртом на Балкан као растуће, али буџетски ограничено тржиште. Такође, истиче њихов растући значај и указује на потенцијале које ова технологија доноси у будућем развоју безбедносних и цивилних система.

ЗАХВАЛНИЦА

Ово истраживање није добило екстерно финансирање. Изражавам захвалност професорки др Милени Кнежевић на стручној подршци, саветима и указаном поверењу током израде овог рада. Њено стручно вођење и конструктивни предлози представљали су драгоцен допринос у реализацији теме.

ЛИТЕРАТУРА

SIPRI Yearbook (различите године издања). Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI)

Gilli, A., & Gilli, M. (2019). The Diffusion of Drone Warfare: Industrial, Organizational, and Infrastructural Constraints. *International Security, 43*(3), 41-78.

Singer, P. W. (2009). Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century. *Penguin Press*.

Kreps, S. E. (2016). Drones: What Everyone Needs to Know. *Oxford University Press*.

Boyle, M. J. (2020). The Drone Age: How Drone Technology Will Change War and Peace. *Oxford University Press*.

Biddle, S., & Oelrich, I. (2016). Future Warfare in the Age of Drones. *International Security, 41*(3), 7-42.

Horowitz, M. C., & Fuhrmann, M. (2018). Droning On: Explaining the Proliferation of Unmanned Aerial Vehicles. *International Organization, 72*(4), 835-871.

Cappello, G. (2023). Military Expenditures on UAVs: A Comparative Analysis of Global Trends. *Defense & Security Journal, 12*(2), 45-69.

Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). Military Expenditure Database. https://www.sipri.org/databases/milex

International Institute for Strategic Studies (IISS). The Military Balance 2023. https://www.iiss.org/publications/the-military-balance/the-military-balance-2023

NATO Defense Expenditure Reports. https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_226465.htm

U.S. Congressional Research Service (CRS). Unmanned Aerial Vehicles: Current Procurement Trends and Future Prospects. https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47188

Al Jazeera Balkans (2024). Шведска ће финансирати производњу украјинских далекометних дронова. https://balkans.aljazeera.net/news/balkan/2024/3/15/svedska-ce-finansirati-proizvodnju-ukrajinskih-dalekometnih-dronova

Telegraf.rs (2024). Хрватска набавља борбене дронове Бајрактар у вредности од 95 милиона евра. https://www.telegraf.rs/vesti/jugosfera/3765489-hrvatska-nabavlja-borbene-dronove-bajraktar-u-vrednosti-od-95-miliona-evra

Baykar Technologies (2024). Official Reports on Bayraktar TB2 Sales. https://www.baykartech.com/en/news/bayraktar-tb2-exports-reach-30-countries/

StatInvestor (2025). Military drones (UAS/UAV): estimated U.S. and global procurement budget 2014-2023. https://www.statinvestor.com/data/1031/military-drones-uas-uav-estimated-us-and-global-procurement-budget-2014-2023/

Министарство одбране Републике Србије (2024). Нови дронови за надмоћ на савременом бојишту. https://www.mod.gov.rs/cir/18770/novi-dronovi-za-nadmoc-na-savremenom-bojistu-18770

European Commission (2022). Drone Strategy: Creating a large-scale European drone market. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/drone-strategy-creating-large-scale-european-drone-market-2022-11-29_en

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Pregledni članak

ANALIZA FINANSIJSKIH IZDVAJANJA ZA ODBRANU OD STRANE ''SVETSKIH SILA'' U PERIODU OD 2020. DO 2024. GODINE

ANALYSIS OF FINANCIAL ALLOCATIONS FOR DEFENSE BY "WORLD POWERS" IN THE PERIOD FROM 2020 TO 2024

TANJA MLADENOVIĆ[1], TAMARA DIMIĆ[2], VINKO ŽNIDARŠIČ[3]

[1] Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija, tanja.mladenovic@va.mod.gov.rs, 0009-0002-3755-6419
[2] Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija, tdimic.nir@gmail.com, 0009-0004-4377-8485
[3] Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija, vinko.znidarsic@gmail.com, 0000-0002-1449-0448

Rezime: *U ovom radu analiziraju se finansijska izdvajanja za odbranu tri velike sile – Velike Britanije, Nemačke i Sjedinjenih Američkih Država – u periodu 2020–2024. godine. Cilj rada jeste da se utvrde trendovi i prioriteti u finansiranju sistema odbrane u posmatranim državama, kao i da se istraži da li postoje razlike u strategijama ulaganja. Primenjena je komparativna analiza na osnovu sekundarnih podataka zvaničnih izvora, a rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Nalazi pokazuju razlike u strukturi budžetskih izdvajanja, kao i u pristupu modernizaciji i strateškom planiranju sistema odbrane. Rezultati mogu doprineti boljem razumevanju geopolitičkih prioriteta i vojnih potencijala ovih zemalja.*

Ključne reči: *Izdvajanja za odbranu, vojni budžet, bruto domaći proizvod, komparativna analiza.*

Abstract: *This paper analyzes the financial allocations for the defense of the three great powers - Great Britain, Germany and the United States of America - in the period 2020-2024. year. The aim of the work is to determine the trends and priorities in the financing of the defense system in the observed countries, as well as to investigate whether there are differences in investment strategies. A comparative analysis was applied based on secondary data from official sources, and the results were presented tabularly and graphically. The findings show differences in the structure of budget allocations, as well as in the approach to modernization and strategic planning of the defense system. The results can contribute to a better understanding of the geopolitical priorities and military potential of these countries.*

Keywords: *Defense allocations, military budget, gross domestic product, comparative analysis.*

1. UVOD

Sagledavajući finansiranje sistema odbrane mogu se uočiti određene vrste ulaganja, kao što su ulaganja u vojnu opremu, obuku pripadnika, personalne troškove, infrastrukturu, logistiku, istraživanje i razvoj. Svaki od ovih pojedinačnih elemenata iziskuje značajna finansijska sredstva za nabavku, održavanje kao i unapređenje sistema u celosti u cilju razvoja i unapređenja odbrambenih sposobnosti zemlje. Inicijalni razlog kontinuiranog finansiranja sistema odbrane predstavlja bazu za prosperitet države u celosti. Naročito jer se prilikom posmatranja svetske scene može se uvideti niz pretnji po bezbednosti i stabilnost jedne države, ali i regiona. Neki od aktuelnih izazova na svetskoj sceni su: terorizam, sajber rat, regionalni sukobi, zaštita resursa i odvraćanje od vršenja političko-ekonomskih uticaja. Istovremeno, finansiranje odbrane doprinosi ekonomskom rastu i razvoju privrednog sistema država kroz otvaranje novih radnih mesta u odbrambenoj industriji, ali se pravi i osnova za podršku stvaranju ekonomskih veza sa stranim investitorima.

Odbrambena industrija je značajan izvor zapošljavanja jer usled priliva stranih i domaćih investicija dolazi do otvaranja novih radnih mesta i stvaranja mogućnosti za prekvalifikaciju ili obuku stanovništva, te se takvim pristupom pokreće tehnološki napredak. Ulaganjem u odbranu, države mogu stimulisati svoje ekonomije i podsticati inovacije u različitim sektorima.

Finansiranje odbrane omogućava zemljama da održe jake diplomatske odnose i saveze. (Sojanović, S., Nikolić, S., 2009: 2) Sporazumi o saradnji u oblasti odbrane često zahtevaju finansijske doprinose, a

DRAFT VERZIJA

ispunjenjem istih se jačaju međunarodna i regionalna partnerstva i unapređuje kolektivna bezbednost. Ovakav vid saradnje je od ključnog značaja u rešavanju globalnih izazova i održavanju mira i stabilnosti.

Dostupnost informacija u današnjem vremenu doprinosi potrebi za transparentnošću kontrolisanih finansijskih izdavanja za sistem odbrane. Ovakav pristup doprinosi očvršćivanju poverenja među građanima i podstiče odgovornost unutar vlade. Najvažniji cilj koji se na taj način postiže jeste izgradnja i očuvanje sigurnosti i prosperiteta građana.

Cilj sprovedenog istraživanja je da analizom iznosa, trendova i prioriteta u finansiranju sistema odbrane u SAD-u, Velikoj Britaniji i Nemačkoj u periodu 2020–2024. godine, uoče kako su se menjala izdvajanja za odbranu u analiziranim državama tokom posmatranog perioda i koje razlike postoje u pristupu budžetiranju odbrane? Koristeći metodu kvantitativne analize budžetskih izdvajanja, uz grafičko i tabelarno prikazivanje ključnih podataka, sa fokusom je na identifikaciji strateških prioriteta, investicija u modernizaciju, kao i odnosu država prema NATO standardima.

2. FINANSIJSKA IZDVAJANJA ZA SISTEM ODBRANE VELIKE BRITANIJE U PERIODU OD 2020. DO 2024. GODINE

Velika Britanija izdvaja deo svog nacionalnog budžeta za finansiranje sistema odbrane radi ulaganja u osoblje, opremu, operacije, istraživanja i razvoj i infrastrukturu. Odnos ulaganja se definiše kroz složeni proces koji uzima u obzir različite faktore kao što su pretnje nacionalnoj bezbednosti, strateški prioriteti i budžetska ograničenja. Vlada Velike Britanije u suštini definiše svoje planove potrošnje za odbranu strateškim dokumentima kao što su Strateški pregled odbrane i bezbednosti i Dokument o komandi odbrane.

Opredeljena sredstva za sistem odbrane Velika Britanija koristi u sledećim ključnim oblastima: osoblje (sredstva se dodeljuju za regrutaciju, obuku i održavanje vojnog osoblja u svim rodovima i vidovima oružanih snaga, uključujući kopnenu vojsku, mornaricu i vazduhoplovstvo), oprema i nabavka (sredstva se dodeljuju za nabavku, održavanje i modernizaciju vojne opreme i platformi, kao što su različiti sistemi naoružanja, vozila, avioni i brodovi), operacije i obuka (sredstva se dodeljuju za podršku izvođenju vojnih operacija, vežbi i aktivnosti procesa obuke), istraživanje i razvoj (ulže se u inovacije odbrambenih tehnologija) i infrastruktura i podrška (sredstva se dodeljuju za održavanje i razvoj vojnih baza, objekata i infrastrukture u celini. (Foley, Brooke-Holland, & Mills, 2025)

U periodu od 2021. godine do 2022. godine od strane Velike Britanije utrošeno je 51 milijardi funti na odbranu, što predstavlja 1,9 milijardi funti više nego godinu dana ranije. Na pregledu potrošnje 2020. godine, Ministarstvu odbrane Velike Britanije odobreno je četvorogodišnje poravnanje kroz odobrenje dodatnih 16,5 milijardi funti novčanih sredstava za budžet sistema odbrane u periodu od 2020. do 2025. godine (Tabela 1).

Tabela 1: Finansijska izdvajanja za sistem odbrane Velike Britanije u periodu od 2020. do 2024. godine. (Foley, Brooke-Holland, & Mills, 2025; NATO 2023: 15)

Država	2020	2021	2022	2023	2024
Velika Britanija (učešće izdataka u ukupnom BDP)	49,1 mlrd € (2.1%)	51 mlrd € (2.2%)	54 mlrd € (2.3%)	58 mlrd € (2.3%)	56 mlrd € (2.4%)

U svetlu trenutne situacije na globalnom nivou, gde protežira ruska invazija na Ukrajinu, u okviru izdataka za odbranu u prolećnom budžetu za 2023. godinu odobreno je dodatnih 5 milijardi funti, kao i dodatnih 2 milijarde funti godišnje u periodu od 2027. do 2028. godine, što će predstavljati povećanje potrošnje od ukupno 11 milijardi funti. Ovakvim postupanjem godišnji budžet za sistem odbrane biće za 5.8 milijardi funti veći, te će iznositi 51,7 milijardi funti u periodu od 2024. do 2025. godine (Tabela 1).

Kao članica NATO saveza, Velika Britanija je u obavezi da izdvoji 2% svog bruto domaćeg proizvoda za odbranu, a u 2022. godini bila je samo jedna od devet članica NATO saveza koje su dostigle cilj izdvajanja od 2,1% bruto domaćeg proizvoda za odbranu (Tabela 1). (NATO 2023: 15)

Sve informacije o ulaganjima u sistem odbrane Velike Britanije dostupne su u godišnjem dokumentu o resursima Ministarstva odbrane (MOD). Limit ukupnih resornih rashoda (TDEL) je najistaknutiji izvor koji pokazuje potrošnju u oblasti odbrane. U monetarnom smislu, potrošnja na sistem odbrane u periodu od 2021. do 2022. godine iznosila je 51 milijardi funti, što je realno povećanje od 1,9 milijardi funti u odnosu na prethodnu godinu. Značajan deo povećanja potrošnje u periodu od 2022. do 2023. godine može se prepisati primeni MSFI 16, računovodstvenog standarda čijom primenom se održava drugačiji prikaz strukture

ODBRANA

rashoda te podaci Ministarstva odbrane za ovu godinu pokazuju dodatnih 3 milijardi funti kao rezultat te implementacije.

3. FINANSIJSKA IZDVAJANJA ZA SISTEM ODBRANE NEMAČKE U PERIODU OD 2020. DO 2024. GODINE

Izdvajanja Nemačke za sistem odbrane u navedenom periodu igraju ključnu ulogu u obezbeđivanju nacionalne bezbednosti i održavanju mira u regionu. Kao jedna od vodećih evropskih država, ona prepoznaje važnost jake odbrambene sposobnosti i svoju poziciju u aktuelnosti sve složenijih uticaja. Finansiranje Nemačkog odbrambenog sektora tokom ovog perioda je neophodno i strateško ulaganje u očuvanje interesa zemlje. Bezbednosni izazovi sa kojima se suočavaju obuhvataju porast nedržavnih aktera, sajber pretnji, migracija stanovništva, regionalne sukobe čime se dodatno stavlja akcenat na značaj ulaganja u odbranu čime bi Nemačka mogla da podrži unapređenje svojih vojnih kapaciteta, modernizaciju opreme i usvajanje i razvoj najmodernijih i najnaprednijih tehnologija u susret novim pretnjama.

Tabela 2: Finansijska izdvajanja za sistem odbrane Nemačke u periodu od 2020. do 2024. godine. (Federal Ministry of Defence, 2024)

Država	2020	2021	2022	2023	2024
Nemačka (učešće izdataka u ukupnom BDP)	46 mlrd € (1.3%)	47 mlrd € (1.4%)	51 mlrd € (1.5%)	50 mlrd € (1.4%)	52 mlrd € (1.5%)

Investiranje u odbranu doprinosi i kolektivnoj sposobnosti NATO-a i Evropske unije, a kao članica ovih međunarodnih entiteta Nemačka ima obavezu da izdvoji definisana sredstva za ulaganje u sistem odbrane. Mimo toga, svojim ulaganjima kao i Velika Britanija, Nemačka osnažuje partnerstvo sa drugim članicama i podstiče stabilnost i saradnju u regionu. Nemačka kao članica NATO-a ima odgovornost da doprinese naporima kolektivne odbrane. Uzimajući u obzir konstantnu evoluciju bezbednosnih pretnji potrebno je izdvojiti dovoljno resursa za suprotstavljanje svim izazovima. Statistički podaci pokazuju da Nemačka teži da usaglasi svoje ulaganje u sistem odbrane sa standardima NATO alijanse, odnosno ranije pomenutih 2% bruto društvenog proizvoda, što ukazuje na posvećenost države da ispuni svoje obaveze u okviru ove međunarodne organizacije, ali i da prepoznaje svoje mesto i ulogu na globalnoj sceni. Nemačka je u 2020. godini uložila u sistem odbrane 46 milijardi evra, u 2021. godini 47 milijardi evra, u 2022. godini 51 milijardu evra, u 2023. godini 50 milijardi evra, dok je u 2024. godini izdvojila ukupno 52 milijarde evra (Tabela 2). (Federal Ministry of Defence, 2024)

4. FINANSIJSKA IZDVAJANJA ZA SISTEM ODBRANE SJEDINJENIH AMERIČKIH DRŽAVA U PERIODU OD 2020. DO 2024. GODINE

Poslednjih godina pitanje finansiranja odbrane postalo je tema od velikog značaja i pitanje skoro svih debata u Sjedinjenim Američkim Državama, koje kao globalna supersila igraju ključnu ulogu u održavanju globalne stabilnosti i bezbednosti. Stoga, od suštinskog je značaja da se razume značaj finansiranja odbrane ove zemlje. Cilj koji opravdava ulaganje u sistem odbrane je podrška međunarodnim aktivnostima i procesima u kojima su Sjedinjene Američke Države kao pokretač ili učesnik, te je neophodno održati visok nivo jake i sposobne vojske. Samim tim, predviđena finansijska sredstva omogućavaju modernizaciju sistema naoružanja i opreme, zapošljavanje i obuku pripadnika, razvoj naprednih tehnologija i održavanje vojnog aparata kojim raspolažu.

Tabela 3: Finansijska izdvajanja za sistem odbrane Sjedinjenih Američkih Država u periodu od 2020. do 2024. godine. (Peter G. Peterson Foundation, 2023)

Država	2020	2021	2022	2023	2024
SAD (učešće izdataka u ukupnom BDP)	732 mlrd $ (3.2%)	741 mlrd $ (3.3%)	801 mlrd $ (3.5%)	816 mlrd $ (3.4%)	850 mlrd $ (3.6%)

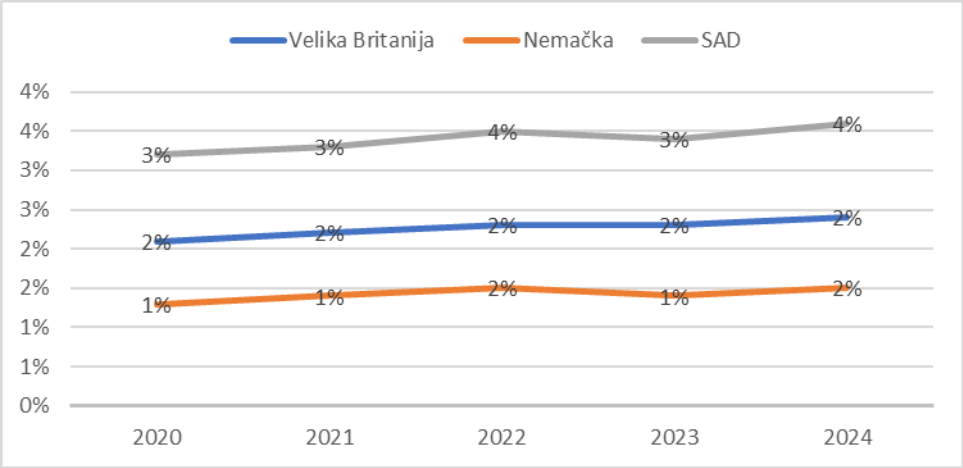
Prema dostupnim statističkim podacima, američki odbrambeni budžet u 2020. godini iznosio je 738 milijardi dolara, što je činilo približno 3,4% bruto domaćeg proizvoda zemlje. (Peter G. Peterson Foundation, 2023) Ova značajna izdvajanja u sistem odbrane odražavaju veličinu vojne sile kojom

DRAFT VERZIJA

Sjedinjene Američke Države raspolažu kao i troškove podrške tekućim operacijama u zemlji i inostranstvu. Težište se stavlja na modernizaciju opreme, unapređenje programa obuke, istraživanje i razvoj. Samu brojnost govore pokazatelji da su oružane snage Sjedinjenih Američkih Država u 2020. godini na raspolaganju imale gotovo 1,3 miliona aktivnog osoblja, 800 hiljada rezervnih pripadnika i oko 750 hiljada vojnih službenika, pritom ne računajući skoro 200 hiljada penzionisanih rezervista, oko 41 hiljadu aktivnih pripadnika obalske straže i oko 6 hiljada lica u pripravnosti. Tendencija ulaganja u sistem odbrane beleži porast iz godine u godinu te je u 2021. godini budžet za sistem odbrane iznosio 740,5 milijardi dolara, a u svetlu novonastalih situacija u svetu, visina odobrenih sredstava u 2023. i 2024. godini je zabeležila značajan porast, odnosno 856 milijardi dolara i 900 milijardi dolara (Tabela 3).

Komparativnom analizom finansijskih izdvajanja za sistem odbrane Velike Britanije, Nemačke i Sjedinjenih Američkih Država u periodu od 2020. do 2024. godine, može se zaključiti da Velika Britanija beleži stabilan rast u skladu sa NATO ciljevima od 2% BDP-a. Nemačka pokazuje povećana ulaganja naročito nakon 2022. godine, usled promenjenih bezbednosnih uslova u Evropi. SAD zadržavaju najveći apsolutni iznos, sa tendencijom kontinuiranog rasta zbog globalnih obaveza i tehnološke modernizacije (Grafikon 1).

Grafikon 1: Učešće finansijskih izdvajanja u okviru BDP-a za sistem odbrane Velike Britanije, Nemačke i Sjedinjenih Američkih Država u periodu od 2020. do 2024. godine



Pored identifikovanih razlika u iznosima i dinamici ulaganja, uočeni su različiti nacionalni prioriteti. SAD ostaju globalni lider po apsolutnom iznosu izdvajanja, dok Velika Britanija i Nemačka usklađuju svoje budžete sa NATO preporukama. Dalja istraživanja mogu obuhvatiti i druge faktore, kao što su unutrašnjepolitički stavovi prema potrošnji na odbranu, kao i detaljnije poređenje efikasnosti korišćenja sredstava.

5. ZAKLJUČAK

Statistika finansiranja odbrane sama po sebi ne daje potpunu sliku o vojnim sposobnostima određene zemlje. Faktori, kao što su tehnološki napredak, vojni savezi i efikasnost potrošnje na odbranu takođe igraju ključnu ulogu. Međutim, analizom statistike finansiranja odbrane može se steći izvestan uvid u prioritete jedne države i njenu posvećenost nacionalnoj bezbednosti.

Poređenjem statističkih podataka o finansiranju odbrane u Velikoj Britaniji, Nemačkoj i Sjedinjenim Američkim Državama otkriveni su različiti nivoi ulaganja u sistem odbrane. Dok se Velika Britanija i Nemačka trude da održe i dostignu usaglašeni nivo ulaganja, Sjedinjene Američke Države se ističu daleko većom količinom sredstava koje ulažu u sistem odbrane. Ovakvi pokazatelji označavaju različite pristupe i prioritete, odnosno mogu ukazivati na planirane strategije planiranja i razvoja.

Na prostoru evropskog kontinenta Velika Britanija je konstantno jedan od najvećih potrošača na odbranu, dok se Nemačka sa druge strane suočava sa kritikama jer ne ispunjava postavljene NATO standarde. Nasuprot tome Sjedinjene Američke Države su konstantno najviše ulagale u svoj sistem odbrane čime održavaju svoju globalnu vojnu dominaciju i štite svoje interese širom sveta.

Upoređujući ove tri zemlje, možemo uvideti različite strategije koje se sprovode u cilju obezbeđivanja pre svega nacionalne bezbednosti, uz uspostavljanje ravnoteže između potrošnje na odbranu i drugih oblasti koje

su od nacionalnog značaja. Iako je odbrana ključna, ne bi trebalo da zaseni ulaganja u druge segmente poput obrazovanja, zdravstva i infrastrukture. Efikasnom raspodelom resursa, može se postići sveobuhvatni pristup nacionalnoj bezbednosti i obezbediti dobrobit svih građana.

Potrošnja na odbranu je složeno pitanje koje zahteva pažljivo razmatranje. Posmatrajući date primere može se zaključiti da ulaganje u odbranu doprinosi: saradnji na međunarodnom nivou što donosi napredne tehnologije i znanja koje poboljšavaju kapacitete oružanih snaga, otvaranju novih radnih mesta i obuka što pozitivno utiče na vojnu industriju i doprinosi razvoju stručnog kadra za odbrambenu industriju, ojačavaju se položaji na međunarodnoj sceni i smanjuju se rastuće napetosti i sukobi.

LITERATURA

Federal Ministry of Defence. (2024). Defence budget figures 2020–2024. BMVg.de. https://www.bmvg.de/en/topics/finance.

Foley, N. M., Brooke-Holland, L. & Mills, C. (2025) UK defence spending. House of Commons Library. Research Briefing. 28. May. 2025. https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-8175/CBP-8175.pdf

Mettam, G.R., & Adams, L.B. (2009). How to prepare an electronic version of your article. In B. S. Jones, &Federal Ministry of Defence. (2024). Defence budget figures 2020–2024. BMVg.de. https://www.bmvg.de/en/topics/finance.

NATO (2023) Defence expenditure of NATO countries (2014-2022). The North Atlantic Treaty Organization. 21. Mar.2023. https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_212891.htm and https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/230321-def-exp-2022-en.pdf.

Peter G. Peterson Foundation. (2023, April 28). Budget Basics: National Defense. Pgpf.org. https://www.pgpf.org/budget-basics/budget-explainer-national-defense .

Sojanović, S., Nikolić, S. (2009) Nova globalna podela moći. Beograd

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

FINANSIRANJE SEKTORA ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE TOKOM PANDEMIJE COVID - 19

FINANCING THE DEFENSE SECTOR OF THE REPUBLIC OF SERBIA DURING THE COVID – 19 PANDEMIC

SERGEJ ZARIĆ[1]

[1] Vojna akademija, Beograd,sergejzaric88@gmail.com, 0009-0009-7739-5745

***Rezime**: Ovaj rad razmatra budžetska izdvajanja za sektor odbrane Republike Srbije tokom pandemije COVID – 19, u cilju utvrđivanja da li je očuvan kontinuitet u finansiranju i razvoju odbrambenih kapaciteta u uslovima vanredne zdravstvene i ekonomske situacije. Predmet istraživanja su budžetski izdaci Ministarstva odbrane u 2020. godini, sa akcentom na njihovu strukturu, stabilnost i uporednu poziciju u odnosu na regionalne i globalne trendove. Istraživanje je sprovedeno analizom relevantnih zvaničnih izvora i sekundarnih podataka. Nalazi pokazuju da su izdaci za odbranu u Republici Srbiji ostali stabilni i da nisu umanjeni usled pandemije. Pored toga, Srbija je zadržala udeo izdataka za odbranu iznad globalnog proseka, uz realizaciju ključnih investicija. Rezultati ukazuju na otpornost sektora i na važnost strateškog i dugoročnog pristupa finansiranju odbrane u kriznim okolnostima.*

***Ključne reči:** izdaci, budžet, sistem odbrane, Republika Srbija, Pandemija COVID – 19.*

***Abstract:** This paper analyzes the defense budget of the Republic of Serbia during the COVID-19 pandemic, with the aim of assessing whether the continuity of defense financing was maintained during a period of public health and economic crisis. The subject of the research is the structure and stability of defense expenditures in 2020, with reference to Serbia's position in relation to global and regional trends. The methodology is based on the analysis of official government data and comparative indicators. The findings show that Serbia preserved a stable level of defense expenditures, maintaining its defense share above the global average. Moreover, key investments in modernization, personnel, and infrastructure were implemented as planned. The results emphasize the importance of resilience and strategic continuity in defense financing, even under exceptional circumstances.*

***Keywords**: expenditures, budget, defense system, Republic of Serbia, COVID – 19 pandemic.*

1. UVOD

Pandemija COVID – 19, kao globalna zdravstvena i bezbednosna kriza, imala je duboke posledice po sve sfere društva, uključujući i nacionalne sisteme odbrane. Iako su oružane snage većine država pretežno fokusirane na tradicionalne bezbednosne izazove, pandemija je ukazala na potrebu njihove adaptacije i uloge u vanrednim situacijama, posebno u pružanju logističke, medicinske i infrastrukturne podrške civilnom sektoru. U strategiiji nacionalne bezbednosti Republike Srbije, epidemije i pandemije zaraznih bolesti prepoznate su kao izazovi, rizici i pretnje po bezbednost, pri čemu se ističe da će se „naročita pažnja posvetiti sprečavanju i suzbijanju zaraznih bolesti, kao i njihovom otklanjanju i iskorenjivanju". (Stanojević & Mandić, 2021)

U takvim okolnostima, finansiranje sektora odbrane postaje ključno pitanje, jer očuvanje funkcionalnosti vojske i drugih komponenti bezbednosnog sistema zavisi od kontinuiteta ulaganja. Budžetska izdvajanja za odbranu u Republici Srbiji uređena su Zakonom o budžetskom sistemu, a planirana sredstva se godišnje definišu Zakonom o budžetu. (Žugić, 2008)

Cilj ovog rada jeste da se analizira nivo i struktura budžetskih izdataka za odbranu u Republici Srbiji tokom pandemije COVID – 19, uz poređenje sa regionalnim i globalnim trendovima. Rad nastoji da odgovori na pitanje: da li je u uslovima krize očuvan kontinuitet u finansiranju sektora odbrane i da li je došlo do promene u prioritetima unutar bezbednosne politike. Predmet istraživanja su budžetska izdvajanja za Ministarstvo

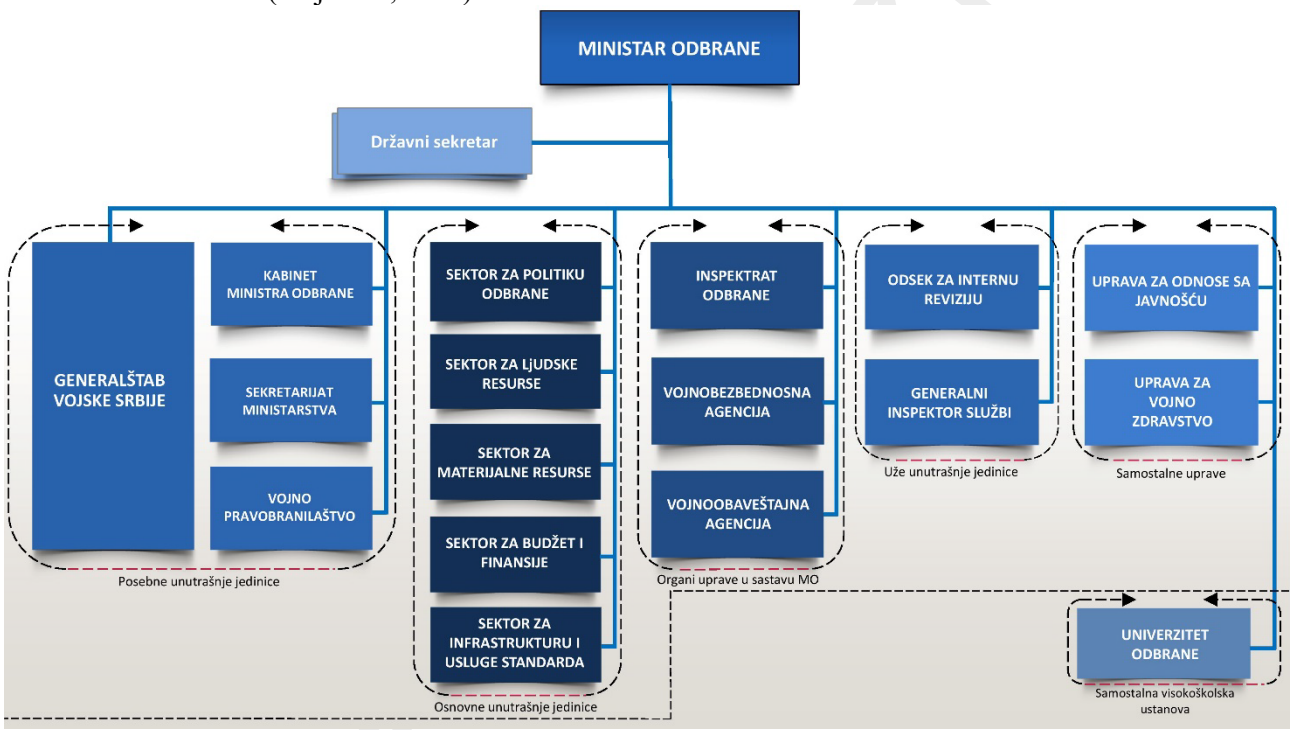
DRAFT VERZIJA

odbrane Republike Srbije u 2020. godini, dok se metodološki pristup zasniva na analizi sekundarnih izvora, uključujući zvanične finansijske izveštaje, strategijske dokumente i uporedne podatke međunarodnih organizacija kao što su SIPRI (2021), IISS (2021) i NATO (2021). Očekivan doprinos rada ogleda se u boljem razumevanju dinamike finansiranja sektora odbrane u vanrednim okolnostima i ukazivanje na značaj dugoročne fiskalne stabilnosti u održavanju bezbednosnih kapaciteta države. (Ministarstvo odbrane Republike Srbije, 2010; Stojković, 2008)

2. FINANSIRANJE SISTEMA ODBRANE U REPUBLICI SRBIJI

Finansiranje sektora odbrane u Republici Srbiji predstavlja deo šireg sistema javnih finansija i zasniva se na Zakonu o budžetskom sistemu i godišnjim zakonima o budžetu. (Žugić, 2008) Ministarstvo odbrane i Vojska Srbije spadaju u kategoriju budžetskih korisnika, čije se finansiranje planira, programira i realizuje kroz standardizovani ciklus budžetiranja. (Ministarstvo odbrane Republike Srbije, 2010)

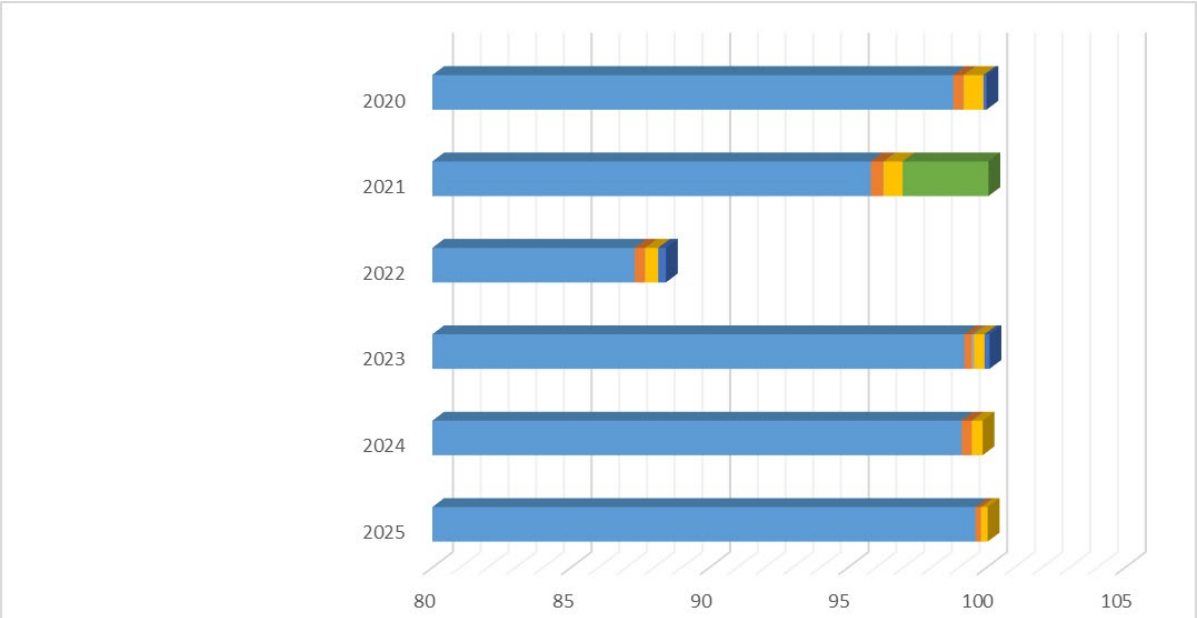
Sam proces obuhvata faze planiranja, programiranja, budžetiranja i izvršenja, u skladu sa pravilnicima koje propisuje Ministarstvo odbrane. Za razliku od pojedinih tumačenja da je sistem odbrane zatvoren, savremeni pristup tretira ga kao otvoren sistem koji komunicira sa spoljnim okruženjem i reaguje na društvene i bezbednosne izazove. (Stojković, 2008)



Slika 1: Organziciona šema Ministarstva odbrane Republike Srbije (Ministarstvo odbrane Republike Srbije, 2010)

Kao što je prikazano na slici 1, Ministarstvo odbrane predstavlja kompleksnu, hijerarhijski uređenu organizaciju koja se sastoji od različitih sektora, komandi, uprava i jedinica, od kojih svaka ima specifične izdatke u okviru funkcionalnog sistema odbrane. Ova institucionalna kompleksnost omogućava efikasno sprovođenje odbrambenih politika, kao i pravovremeno reagovanje na vanredne situacije, uključujući i krizne događaje poput pandemije. Ministarstvo deluje kao deo šireg društvenog sistema i u stalnoj je interakciji sa ostalim državnim organima, što dodatno potvrđuje njegov karakter otvorenog sistema. (Stanojević & Mandić, 2021)

Struktura izdataka Ministarstva odbrane obuhvata rashode za lična primanja, materijalne troškove, investicije, opremu, modernizaciju, naučnoistraživačke projekte, obuku i međunarodnu saradnju. Tokom 2020. godine, nije došlo do značajnog odstupanja od planiranih budžetskih alokacija, što ukazuje na stabilnost sektora čak i tokom pandemijskih uslova. (IISS, 2021a; NATO, 2021)



	2025	2024	2023	2022	2021	2020
01 - Opšti prihodi I primanja iz budžeta	99.6	99.1	99.2	87.3	95.82	98.8
04 - Sopstveni prihodi budžetskih korisnika	0.2	0.36	0.25	0.37	0.45	0.36
08 - Dobrovoljni transferi od fizičkih I pravnih lica	0.001	0.01	0.1	0.011	0.02	0.02
09 - Primanja od prodaje nefinansijske imovine	0.24	0.39	0.38	0.47	0.68	0.71
13 - Neraspoređeni višak I primanja iz ranijih godina			0.18	0.28		0.11
10 - Primanja od domaćih zaduživanja					3.1	

Grafikon 1: Procentualno učešće izvora finansiranja sistema odbrane Republike Srbije u periodu od 2020. do 2025. godine (Zakon o budžetu, 2020. - 2025.)

Na Grafikonu 1 prikazano je procentualno učešće različitih izvora finansiranja sistema odbrane Republike Srbije u periodu od 2020. do 2025. godine. Najznačajniji izvor su opšti prihodi i primanja iz budžeta, koji čine između 90% i 98% ukupnih sredstava namenjenih Ministarstvu odbrane.

Sledeći po značaju su sopstveni prihodi budžetskih korisnika, koji se ostvaruju putem prodaje suvišnih pokretnih stvari, pružanja usluga i iznajmljivanja poslovnog prostora. Prihodi od prodaje nefinansijske imovine, pretežno neperspektivne imovine, predstavljaju dodatni izvor sredstava.

Od 2020. godine, primanja od domaćih zaduživanja takođe postaju deo finansijskog plana i koriste se za pokrivanje rashoda. U prethodnim godinama pojavljuju se i neraspoređeni višak i primanja iz ranijih godina, koji predstavljaju preneta sredstva iz prethodnih budžetskih ciklusa.

Iako se udeo pojedinih izvora razlikuje iz godine u godinu, evidentno je da je u 2025. godini ukupni nivo finansiranja značajno viši u odnosu na 2020. godinu. To ukazuje na sve veću važnost koju država pridaje finansiranju sektora odbrane u cilju očuvanja i unapređenja nacionalne bezbednosti.

3. IZDACI ZA SEKTOR ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE TOKOM PANDEMIJE: REGIONALNI I GLOBALNI KONTEKST

Pandemija COVID – 19 značajno je uticala na globalni bezbednosni ambijent, uzrokujući promene prioriteta i izazove u finansiranju sektora odbrane širom sveta. Vlade su bile suočene s porebom da očuvaju funkcionalnost svojih bezbednosnih sistema, uz istovremeno prilagođavanje ograničenim ekonomskim resursima. Republika Srbija nije bila izuzetak, neophodno je bilo zadržati kontinuitet ulaganja u sektor odbrane uz usklađivanje sa fiksnim mogućnostima države.

Prema podacima iz 2020. godine, većina analiziranih država suočila se sa zajedničkim bezbednosnim rizikom, uz znatno smanjen bruto domaći proizvod (BDP). Tabela 1 prikazuje petnaest država sa najvećim izdvajanjima za odbranu izraženim u apsolutnim iznosima i udelima u BDP – u. Sjedinjene Američke Države prednjačile su sa 738 milijardi dolara (3,55% BDP – a), dok je Kina izdvajala 193,3 milijarde dolara (10,6%

DRAFT

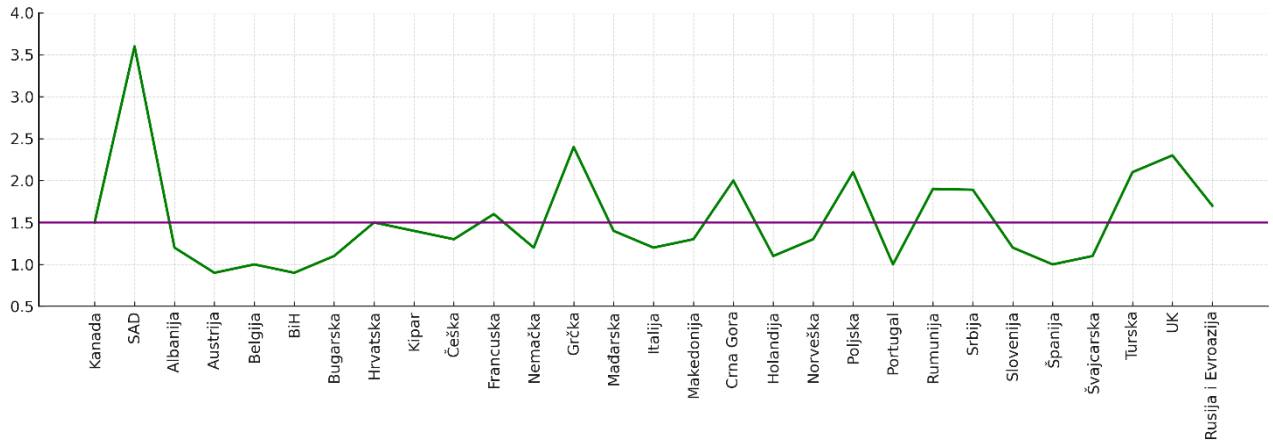
BDP – a) i bila jedina država sa pozitivnim rastom BDP – a u posmatranom periodu (+1,9%). (IISS, 2021b; SIPRI, 2021)

Globalna vojna potrošnja je, uprkos pandemiji, nastavila da raste. Ukupni izdaci za odbranu dostigli su 1,83 triliona dolara u 2021. godini, što predstavlja povećanje od 3,9% u odnosu na prethodnu godinu . Evropske članice NATO – a su, generalno, povećale odbrambenu potražnju u skladu sa rastućim bezbednosnim zahtevima, iako je samo devet zemalja uspelo da dostigne cilj od 2% BDP – a. (NATO, 2021)

Tabela 1: Petnaest država sa najvećim izdacima za odbranu u 2020. godini (u apsolutnim iznosima i udelu u BDP - u) (IISS, 2021a)

Država	Izdvajanja za odbranu		Rast BDP-a
	US$bn	% BDP-a	
SAD	738.0	3.55	-4.3
Kina	193.3	10.6	1.9
Indija	64.1	3.50	-10.3
UK	61.5	2.33	-9.8
Rusija	60.6	4.14	-4.1
Francuska	55.0	2.16	-9.8
Nemaka	51.3	1.36	-6.0
Japan	49.7	2.70	-5.3
Saudijska Arabija	48.5	2.70	-5.4
Južna Koreja	40.4	2.20	-1.9
Australija	31.3	2.30	-4.2
Italija	29.3	1.59	-10.6
Brazil	22.1	1.60	-5.8
Kanada	20.0	1.25	-7.1
Izrael	19.9	4.30	-5.9

Tabela 1 prikazuje najznačajnije globalne vojne potrošače u 2020. godini, sa podacima o iznosima izdataka, udelu u BDP-u i rastu BDP-a, kao osnovu za uporednu analizu u uslovima pandemije.



Grafikon 2: Poređenje izdataka za odbranu u % BDP – a za 2020. godinu (IISS, 2021a)

Republika Srbija je u posmatranom periodu izdvojila za potrebe odbrane 1,89% BDP-a, što je iznad proseka. Od država nastalih raspadom bivše Jugoslavije, jedino je Republika Hrvatska izdvojila procentualno

više od Republike Srbije i to 1,98% BDP-a. Ostale države – Slovenija, Bosna i Hercegovina, Crna Gora i Severna Makedonija izdvojile su iz BDP-a procentualno mnogo manje u odnosnu na Republiku Srbiju, odnosno ispod proseka. Što se tiče regiona tu se Srbija nalazi na četvrtom mestu iza neprikosnovene Rumunije, zatim Mađarske koja je značajno povećala izdvajanja za potrebe odbrane, ali takođe i Bugarska.

Te 2020. godine za sektor odbrane najviše je potrošila Rumunija 5,5 milijardi dolara, zatim Mađarska 1,8 milijardu, Bugarska 1,2 milijarde, dok je Srbija za potrebe namenila 1,04 milijardi dolara. Nakon rebalansa bužeta Ministarstvo odbrane i Vojske Srbije dobili su oko 83 miliona evra više, a najveći deo povećanja, oko 76 miliona evra, odnosio se na nabavke naoružanja i vojne opreme. Crna Gora od svih ima najmanji vojni budžet ali je najbliža NATO standardima po procentu izdvajanja za odbranu u odnosu na bruto domaći proizvod (BDP). (NATO, 2021)

4. ZAKLJUČAK

Pandemija COVID-19 donela je kompleksne izazove za nacionalne sisteme odbrane širom sveta, testirajući otpornost bezbednosnih politika i fiskalnu održivost javnog sektora. Uprkos negativnim ekonomskim efektima, uključujući pad bruto domaćeg proizvoda u većini zemalja, analiza pokazuje da je sektor odbrane Republike Srbije zadržao stabilan nivo izdataka tokom 2020. godine, a izdvajanja su čak bila iznad globalnog proseka (1,89% BDP-a u poređenju sa prosečnih 1,59%).

Srbija je u analiziranom periodu uspešno očuvala kontinuitet ulaganja u ključne funkcionalne komponente sektora odbrane, uključujući modernizaciju, nabavku opreme i infrastrukturne projekte, uprkos fiskalnim ograničenjima izazvanim pandemijom. Poređenjem sa državama regiona i vodećim zemljama sveta, može se zaključiti da je Srbija zadržala relativno povoljnu poziciju, i po procentualnim izdvajanjima i po apsolutnom iznosu sredstava.

Ključni nalazi ovog istraživanja ukazuju na stratešku posvećenost države finansiranju sektora odbrane čak i u vanrednim okolnostima, čime se potvrđuje važnost dugoročnog i održivog pristupa planiranju budžetskih izdvajanja u oblasti bezbednosti. Ovo je posebno značajno u kontekstu globalnih neizvesnosti i rastuće potrebe za prilagođavanjem odbrambenih kapaciteta novim oblicima pretnji, kao što su biološke i hibridne pretnje.

U svetlu navedenog, pandemija nije dovela do urušavanja budžetskih izdvajanja za odbranu, već je potvrdila značaj njihovog očuvanja kao dela šire bezbednosne strategije. S obzirom na podatke iz 2025. godine, koji pokazuju dodatni rast izdataka za odbranu (261,8 milijardi dinara ili 2,53% BDP-a), može se zaključiti da je pandemijska kriza delovala kao katalizator za dalje jačanje sektora, uz redefinisanje njegovih potreba i prioriteta.

LITERATURA

Dess G., Lumpkin G. and Eisner A., Strategijski menadžment. Data status, Beograd, 2007.

Đorđević R., Planiranje, budžetiranje i potrošnja sredstava za finansiranje odbrane u realnim uslovim. doktorska disertacija, Vojna akademija, Beograd, 1999.

IISS, The Military Balance, Chapter Four: Europe, [2021].

IISS, The Military Balance, Chapter:International comparisons of defence expenditure and military personnel, [2021].

IISS. (2021a). The Military Balance: Chapter Four – Europe.

IISS. (2021b). The Military Balance: Chapter – International comparisons of defence expenditure and military personnel.

Knežević, M., Nikolić, S., Neševski, A., Kontrola budžeta u funkciji civilne demokratske kontrole u Republici Srbiji, Vojno delo 03/21.

Kovač M. i Stojković D., Strategijsko planiranje odbrane, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 2009.

Ministarstvo odbrane Republike Srbije, Pravilnik o planiranju, programiranju, budžetiranju i izvršenju u Ministarstva odbrane i Vojsci Srbije. Beograd, 2010.

Ministarstvo odbrane Republike Srbije. (2010). Pravilnik o planiranju, programiranju, budžetiranju i izvršenju u Ministarstvu odbrane i Vojsci Srbije. Beograd.

Mladenović, P., Karović, S. i Radončić, H.: Koncept finansijskog obezbeđenja operacija Vojske Srbije Izdaci i rashodi Kopnene Vojske, Vojno delo 03/17.

DRAFT VERZIJA

NATO. (2021). Defence Expenditure of NATO Countries (2014–2021). NATO Public Diplomacy Division.

Nordhaus S., Ekonomija. MATE, Zagreb, 2007.

Radanović, T., Slavković, R. i Mačak, Z., Koncept finansijskog obezbeđenja operacija Vojske Srbije, Vojno delo 03/17.

Radičić M., Raičević B., Javne finansije, Data status, Beograd, 2008.

Radulović D., Izvori i instrumenti finansiranja Vojske Jugoslavije, magistarski rad, Ekonomski fakultet, Beograd, 1996.

Robbins S. and Coulter M., Management. 9th edition, Pearson Prentice Hall, New Jersay, 2007.

Stanojević, P., & Mandić, G. (2021). Organizaciono-upravljački aspekti logističkog odgovora na krizu izazvanu pandemijom COVID-19 u Srbiji. Bezbednost, 63(3), 121–139.

Stanojević, P., Mandić, G., Organizaciono-upravljački aspekti logističkog odgovora na krizu izazvanu pandemijom COVID 19 u Srbiji, Bezbednost 03/21.

Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). (2021). SIPRI Yearbook 2021: Armaments, Disarmament and International Security. Oxford University Press.

Stojković D., Programiranje funkcionisanja i razvoja sistema odbrane, Vojno delo br. 02, 2008.

Stojković, D. (2008). Programiranje funkcionisanja i razvoja sistema odbrane. Vojno delo, (2), 85–97.

www.mod.gov.rs

Zakoni o budžetu Republike Srbije od 2020. do 2025. godine

Zakoni o budžetu Republike Srbije od 2020. do 2025. godine. Službeni glasnik Republike Srbije.

Žugić, R., Vodič kroz budžet, finansijski plan odbrane, VIZ, Beograd, 2008.

DRAFT VERZIJA

GEOINFORMACIONI SISTEMI

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

UPOTREBA GIS U PROCENI ŠTETNIH UTICAJA DIVLJIH DEPONIJA NA REKE U SRBIJI

APPLICATION OF GIS IN THE ASSESSMENT OF ADVERSE EFFECTS OF ILLEGAL LANDFILLS ON RIVERS IN SERBIA

NEBOJSA JANJIC [1]

[1] Vojnogeografski institut "General Stevan Bošković", Beograd, nebojsajanjic@ymail.com

Rezime: *Prema podacima Agencije za zaštitu životne sredine, u Srbiji je registrivano ukupno 2.536 divljih deponija, od kojih su sa najvećim rizikom po životnu sredinu i zdravlje ljudi, one koje se nalaze na udaljenosti manjoj od 100 m od naselja ili na udaljenosti manjoj od 50 m od obala reka, potoka, jezera ili akumulacija. Analizom dostupnih digitalizovanih geopodataka o divljim deponijama u Republici Srbiji, preuzetih od domaćih i stranih institucija, pomoću GIS alata (GeoMedia Professional), identifikovane su deponije koje se nalaze na udaljenosti od 50 m ili manje od reka. U radu su prikazane manjkavosti javno dostupnih podataka. I pored navedenih manjkavosti, u radu je prikazan način kojim se upotrebom alata GIS obezbeđuje bolji uvid u prostorni raspored i nivo rizika uticaja rizičnih deponija na reke u Srbiji. Sve navedeno obezbeđuje korisne podatke koji nosiocima vlasti omogućavaju donošenje optimalnih i racionalnih rešenja zasnovanih na konkretnim podacima, a u cilju sprovođenja ciljanih i efikasnih akcija uklanjanja i sanacije površina divljih deponija .*

Ključne reči: *GIS, divlje deponije, štetni uticaj.*

Abstract: *According to data from the Environmental Protection Agency, a total of 2,536 illegal landfills have been registered in Serbia, with the highest risk to the environment and human health posed by those located less than 100 meters from settlements or less than 50 meters from the banks of rivers, streams, lakes, or reservoirs. By analyzing the available digitized geospatial data on illegal landfills in the Republic of Serbia, obtained from domestic and international institutions, and using GIS tools (GeoMedia Professional), landfills located at a distance of 50 meters or less from rivers were identified. This study highlights the shortcomings of publicly available data. Despite the identified shortcomings, the paper demonstrates how the use of GIS tools provides a better understanding of the spatial distribution and risk levels associated with the impact of risky landfills on rivers in Serbia. All of the above provides valuable information enabling authorities to make optimal and rational decisions based on concrete data, aimed at implementing targeted and effective actions for the removal and remediation of illegal landfill sites.*

Keywords: *GIS, illegal landfills, adverse effect.*

1. UVOD

Divlja deponija je javna površina na kojoj se nalaze nekontrolisano odložene različite vrste otpada. Prema podacima Agencije za zaštitu životne sredine, u Srbiji je registrivano ukupno 2.536 divljih deponija.

Najčešće se javljaju u seoskim sredinama koje nisu obuhvaćene redovnim prikupljanjem komunalnog otpada od strane javnih komunalnih preduzeća (JKP) u jedinicama lokalne samouprave (najčešće uz saobraćajnice, gde se otpad najčešće kipuje iz kamiona), a kada se nalaze blizu reka, postoji rizik od zagađenja, koje se može brzo širiti.

Deponije sa najvećim rizikom po životnu sredinu i zdravlje ljudi su one koje se nalaze na udaljenosti manjoj od 100 m od naselja ili na udaljenosti manjoj od 50 m od obale reke, potoka, jezera ili akumulacije.

Agencija za zaštitu životne sredine je izvršila digitalizaciju geopodataka o divljim deponijama u Republici Srbiji. U konkretnom slučaju, koristeći podatke o divljim deponijama koji su preuzeti sa sajta Agencije za zaštitu životne sredine i Portala otvorenih podataka Republike Srbije, kao i geopodatke o vodenim površinama koji su preuzeti sa sajta Copernicus Land Monitoring System (CLMS), uz pomoć GIS

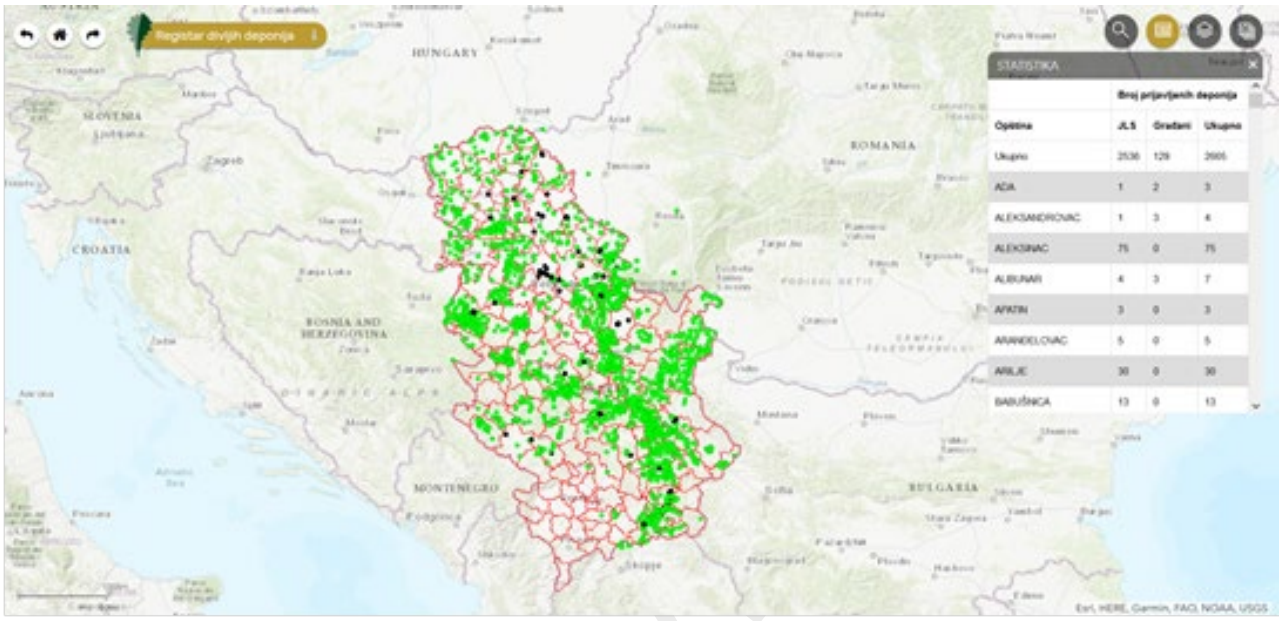
DRAFT VERZIJA

alata (GeoMedia Professional), prikazane su deponije koje su na udaljenosti od 50 m i manje od reka (rizične deponije).

Cilj ovog rada je da pokaže mogućnosti kojima GIS obezbeđuje bolji uvid u trenutno stanje i olakšava eventualno donošenje odluka zasnovanih na konkretnim podacima.

2. PRIKUPLJANJE PODATAKA

Na sajtu Agencije za zaštitu životne sredine dat je neophodan obim geopodataka o divljim deponijama. Primer je dat na Slici 1.



Slika 1: Registar divljih deponija

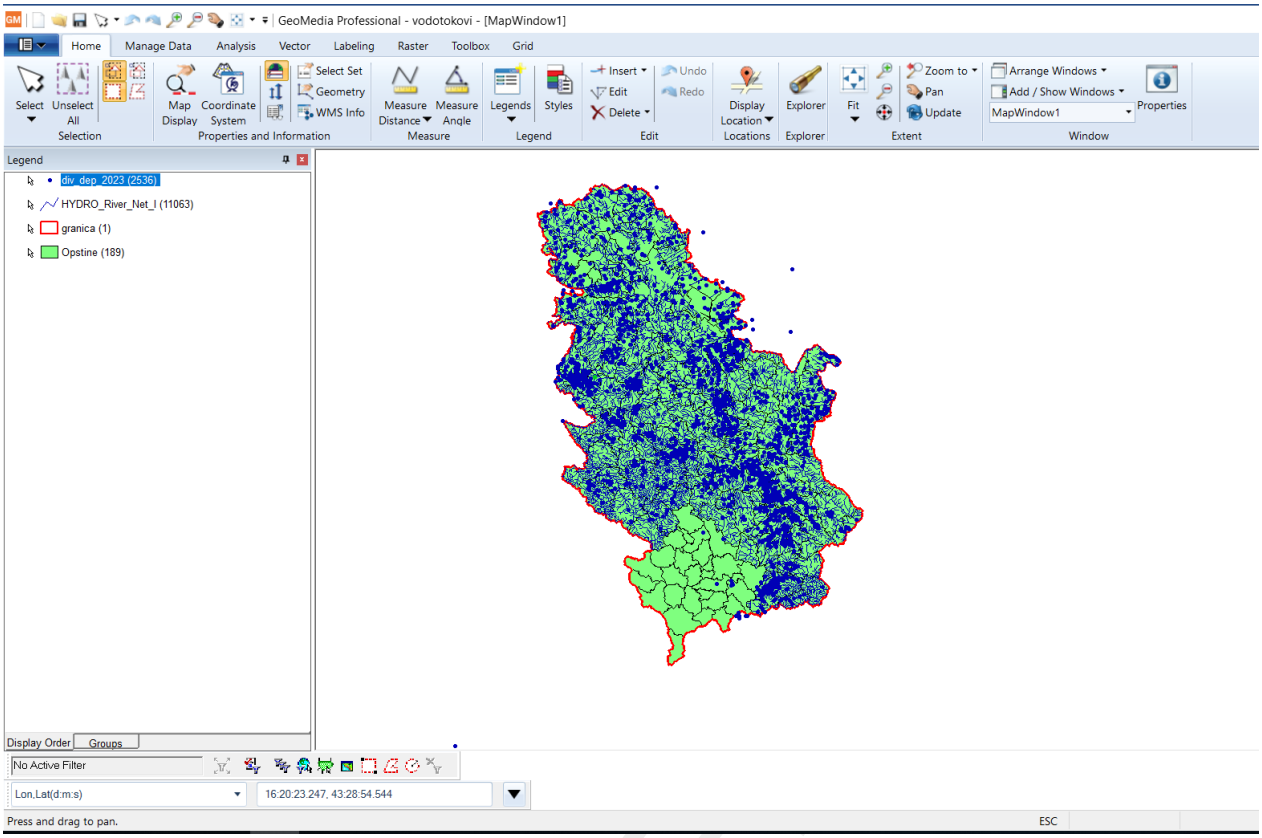
Na portalu otvorenih podataka Republike Srbije, nalaze se istovetni podaci o divljim deponijama u Excel tabeli, koja između ostalih, sadrži podatke o nazivu opštine i naselja, geografskoj širini i dužini, procenjenim količinama otpada, površini zemljišta i drugim podacima za svaku registrivanu divlju deponiju prikazanoj na prethodnoj slici [Lit. 2].

Geopodaci o vodenim površinama u Srbiji preuzeti su sa sajta CLMS, koji je namenjen prikupljanju, obradi i distribuciji prostornih podataka vezanih za korišćenje zemljišta, pokrivač tla, urbane i ruralne sredine, kao i prirodne resurse. Tehničku podršku i realizaciju, sajtu pružaju različite institucije, između ostalih i Evropska agencija za životnu sredinu (European Environment Agency). CLMS pruža prostorne podatke visoke tačnosti koji se redovno ažuriraju i dostupni su za slobodnu upotrebu. Podaci su dostupni u standardnim GIS formatima (poput SHP), što omogućava njihovu laku integraciju u prostorne analize.

3. RAD SA PROSTORNIM PODACIMA

U početnoj fazi kreiran je novi radni geografski prostor (RGP) pod nazivom *vodotokovi.gws*. U ovaj radni prostor integrisani su geoentiteti g*ranic*e i *Opštine*, preuzeti iz baze podataka *Moja Srbija.mdb*, kao i SHP fajlovi *HYDRO_River_Net_l* preuzeti sa platforme CLMS.

Excel tabela sa podacima o divljim deponijama, koja je imala režim pristupa 'read-only', prethodno je konvertovana u SHP format, kako bi bila uključena u dalju analizu. Na Slici 2 prikazan je izgled radnog prozora sa legendom (levo) i digitalnom kartom (desno).



Slika 2: Prikaz divljih deponija u GIS alatu (GeoMedia Professional)

3.1. Priprema podataka

Projekcijom podataka o divljim deponijama, uočeno je da se deo od 2.536 tačaka nalazi van granica Centralne Srbije i Vojvodine. Jedinice lokalne samouprave (JLS) dostavile su podatke koji zahtevaju proveru. Tri ključna pitanja koja zahtevaju proveru su:

1. Šest JLS je izjavilo da na njihovoj teritoriji nema nijedne divlje deponije: Crna Trava, Tutin, Bajina Bašta, Sremski Karlovci, Čajetina i Bački Petrovac.
2. U sedam JLS prijavljena je samo po jedna divlja deponija: Ada, Aleksandrovac, Merošina, Opovo, Srbobran, Titel i Novi Pazar.
3. Šest JLS nije dostavilo nikakve podatke o divljim deponijama: Koceljeva, Paraćin, Pirot, Golubac, Majdanpek i Mionica.

Prethodno navedeno ukazuje na potrebu za detaljnom proverom dostupnih podataka. Iz toga razloga izvršena je delimična provera podatka u samoj Excel tabeli, i utvrđeni su nedostataci, od koji su karakteristični sledeći:

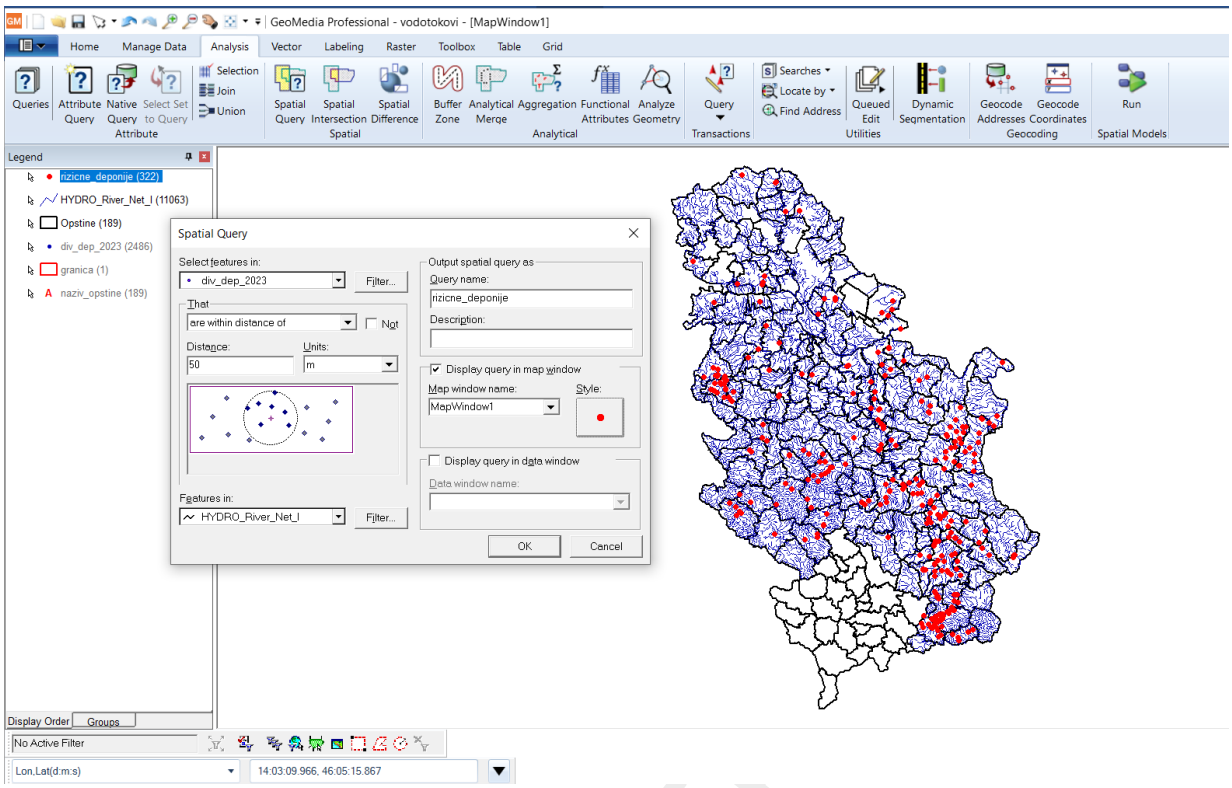
1. Za opštinu Prokuplje, za svih 20 deponija date su iste koordinate (na teritoriji Severne Mitrovice).
2. Za 18 lokacija date su koordinate koje odstupaju od krajnjih tačaka Srbije.
3. Za teritoriju Leskovca, deo datih koordinata je na teritorima opština Lipljan, Dimitrovgrad i Vranje.

Posle izvršene selekcije ulaznih podataka (i onih koji su van treritorija Centralne Srbije i Vojvodine) preostalo je **2.486** pozicija divljih deponija koje će biti dalje obrađivane.

3.2. Obrada podataka

Jednostavnim prostornim upitom dobili smo rezultat da su 322 divlje deponije na udaljenosti manjoj od 50 metara od najbliže reke, (tzv. rizične deponije). Kako je prikazano na slici 3, jasno je uočljiva povećana opterećenost sliva Timoka, Južne i Velike Morave.

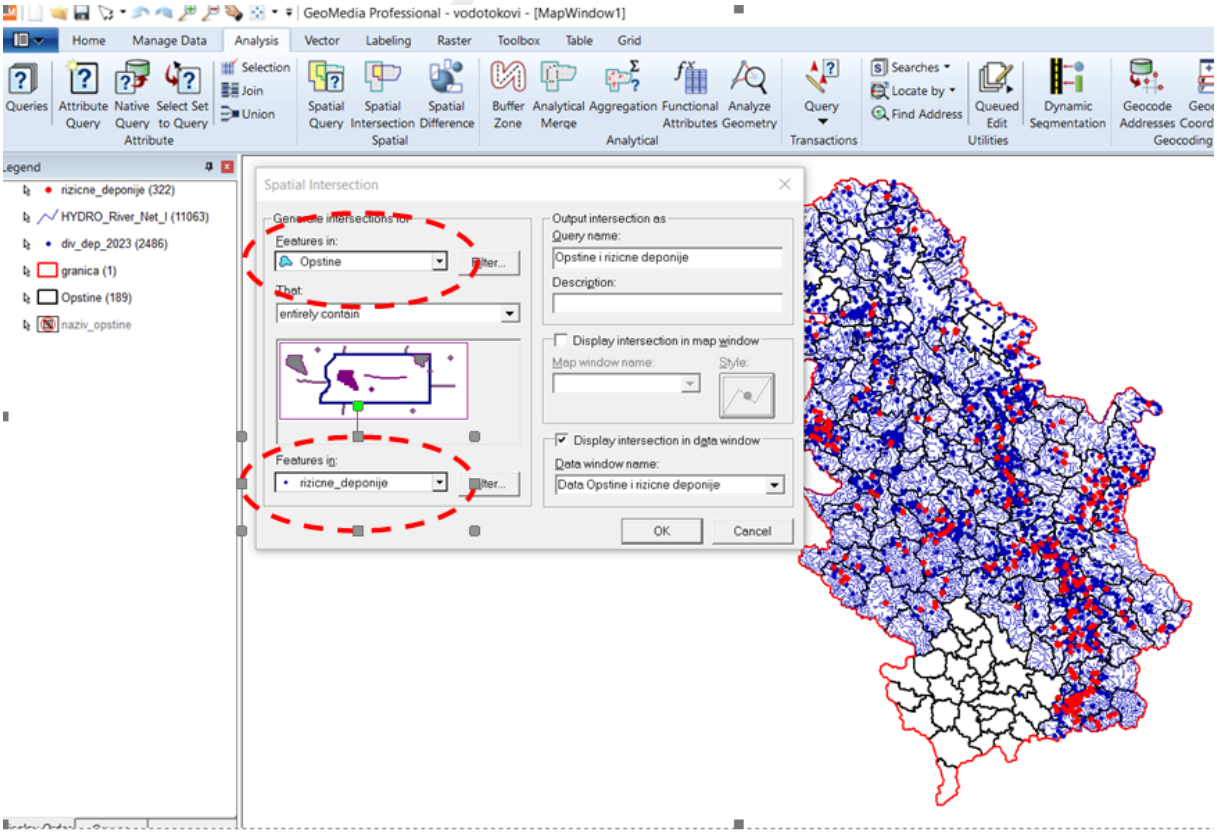
DRAFT VE



Slika 3: Rizične divlje deponije

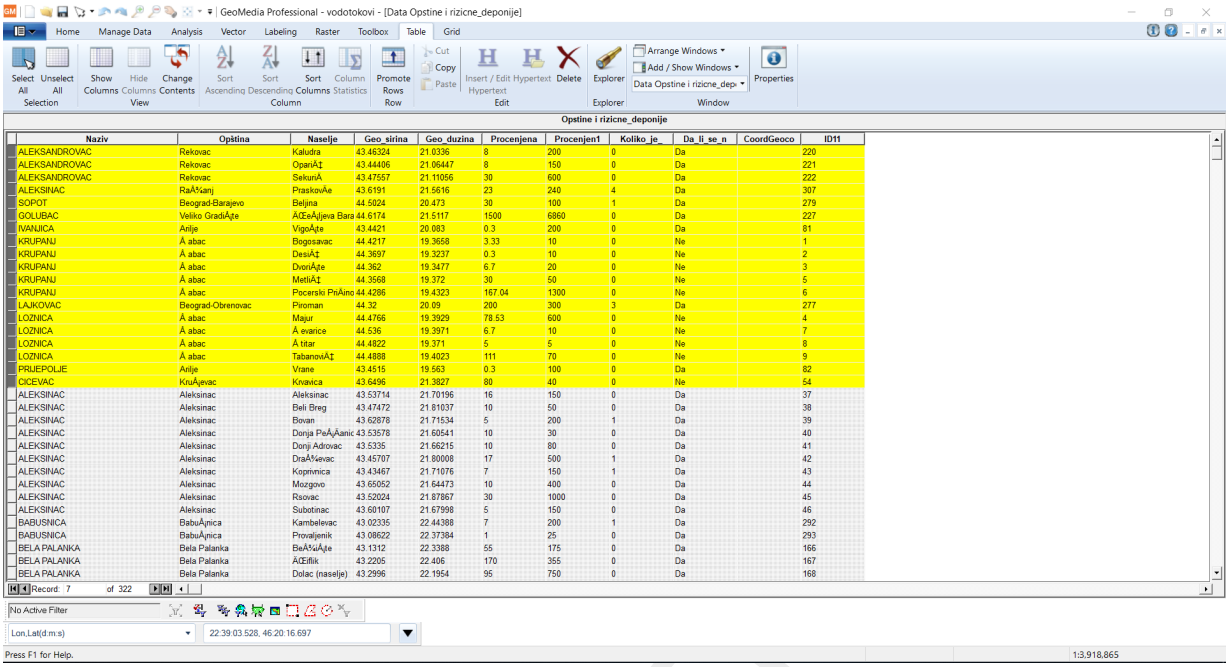
3.3. Analiza rezultata

Kako je u poglavlju 3.1. ukazano na potrebu za detaljnom proverom dostupnih podataka, po izvršenom prostornom upitu izvršena je provera dobijenih podataka o rizičnim deponijama. Prostorno preklapanje geoentiteta *Opštine* i *rizične_deponije* (tačke u poligonu), omogućava nam analizu podudarnosti naziva lokacija sa datim koordinatama (geografskim širinama i dužinama), kao na Slici 4.



Slika 4: Prostorni presek

U rezultujućoj tabeli (Data Opstine i rizicne_deponije) u prvoj koloni Naziv su dati nazivi Opština (poligon), a u ostalim kolonama podaci iz tabele *rizične_deponije* (tačke). Jednostavnim pregledom rezultata utvrđena su neslaganja u podacima u kolonama Naziv i Opština (u 19 redova), što je prikazano na Slici 5.



Slika 5: Rezultujuća tabela (Data Opstine i rizicne_deponije)

Kako prethodni rezultat ukazuje da za još 19 divljih deponija podaci nisu tačni, dalje ih ne treba analizirati, odnosno, **smatraćemo da u Srbiji ima najmanje 303 rizične deponije**.

Na osnovu konačnog skupa identifikovanih rizičnih deponija, u cilu detaljne analize, izdvojene su četiri reprezentativne grupe koje prikazuju karakteristike tri rizične i jedne klasične divlje deponije. U sledećim tabelama prikazane su njihove osnovne prostorne, funkcionalne i ekološke osobine.

Tabela 1: Karakteristične rizične deponije – najveće procenjene količine otpada

Opština	Naselje	Procenjena količina [t]	Procenjena površina [m²]	[t/m²]
ŽAGUBICA	Žagubica	**20.000**	1.200	16.67
IRIG	Irig	**20.000**	50.000	0.4
LEBANE	Ćenovac	**10.050**	10.000	1.005
PANČEVO	Glogonj	**5.971**	8.000	0.75
SJENICA	Vrsjenice	**4.000**	3.100	1.29
ČOKA	Padej	**2.500**	10.000	0.15
NEGOTIN	Mokranje	**1.800**	25.000	0.072

Tabela 2: Karakteristične rizične deponije – najveće procenjene površine

Opština	Naselje	Procenjena količina [t]	Procenjena površina [m²]	[t/m²]
IRIG	Irig	20.000	**50.000**	0.4
NEGOTIN	Mokranje	1.800	**25.000**	0.072
NEGOTIN	Braćevac	750	**15.000**	0.05
NIŠ - GRAD	Crveni Krst	10	**15.000**	0.000667
NIŠ - GRAD	Crveni Krst	10	**15.000**	0.000667
LEBANE	Ćenovac	10.050	**10.000**	1.005
ČOKA	Padej	2.500	**10.000**	0.25

DRAFT

Tabela 3: Karakteristične rizične deponije – najveće procenjeno opterećenje

Opština	Naselje	Procenjena količina [t]	Procenjena površina [m^2]	[t/m^2]
ZAGUBICA	Žagubica	20.000	1.200	**16.67**
MEROSINA	Aleksandrovo	200	100	**2**
CICEVAC	Krvavica	80	40	**2**
BOLJEVAC	Bačevica	114	60	**1.9**
LOZNICA	Tabanović	111	70	**1.59**
SJENICA	Vrsjenice	4.000	3.100	**1.29**
NOVI SAD - GRAD	Begeč	417	333	**1.25**

Tabela 4: Karakteristične divlje deponije – najveće procenjene količine otpada

Opština	Naselje	Procenjena količina [t]	Procenjena površina [m^2]	[t/m^2]
SOMBOR	Sombor	433.680	55.600	**7.8**
SUBOTICA	Čantavir	77.000	28.986	**2.656**
KOVIN	Kovin	60.000	40.000	**1.5**
PANČEVO	Omoljica	58.272	90.000	**0.647**
LEBANE	Togočevce	51.000	50.000	**1.02**
BEČEJ	Bačko Petrovo polje	50.335	40.268	**1.25**
ŠABAC	Ribari	46.222	354	**130.57**

Kod izdvojenih lokacija takođe je potrebno podatke uzeti sa rezervom, (posebno u tabeli 4).

4. ZAKLJUČAK

Upotrebom GIS na lak i efikasan način utvrđeni su nedostaci javno dostupnih podataka o stanju zagađivača (divljih deponija) i stepena kojim mogu ugroziti reke u Srbiji. Od ukupno 2.536 obrađenih divljih deponija, najmanje 303 predstavljaju visok rizik zbog svoje blizine rekama, nalazeći se na udaljenosti od 50 m ili manje.

Upotrebom GIS alata, donosiocima odluka na svim nivoima vlasti omogućava se brže, informisanije i efikasnije donošenje odluka. Integracijom analize geoprostornih podataka, nadležni organi mogu bolje da određuju prioritete delovanja i racionalnije raspoređuju resurse. Ipak, zbog uočenih nedostataka u dostupnim podacima, neophodno je da se pre preduzimanja konkretnih aktivnosti obavezno sprovede provera stanja na terenu, kako bi se obezbedila tačnost i efikasnost planiranih mera.

GIS na ovaj način ostaje ključan alat u unapređenju upravljanja životnom sredinom i sprovođenju efikasnih javnih politika.

LITERATURA

Janjić, N. (2024). *Pregled udaljenosti divljih deponija od vodotokova upotrebom softvera GeoMedia Professional* (Seminarski rad). Geografski fakultet, Univerzitet u Beogradu.

SPOLJAŠNJE VEZE

Registar divljih deponija - https://sepa.gov.rs/ → http://77.46.150.221/kdd/

https://data.gov.rs/s/resources/nesanitarne-i-divlje-deponije/20250124-125659/divlje-deponije.xlsx

https://land.copernicus.eu/en/map-viewer

https://land.copernicus.eu/en/cart-dowloads

DRAFT VERZIJA

INFORMACIONI SISTEMI I TEHNOLOGIJE

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52nd Symposium on Operational Research
Palić, 7 - 10.9.2025.

Pregledni rad

WINDOWS I LINUX OPERATIVNI SISTEMI: POUZDANOST ZAŠTITE KORISNIČKIH PODATAKA, KONTROLA AŽURIRANJA I RIZICI OD MALICIOZNOSTI U LOKALNOJ RAČUNARSKOJ MREŽI

SANJA KLAJIĆ[1], BRANKO VUJATOVIĆ[2], DARKO GRUBAČ[3], NENAD STOJANOVIĆ[4]

[1] Centar za primenjenu matematiku i elektroniku, Beograd, sanja.klajic@vs.rs, 0009-0003-6134-6064
[2] Centar za primenjenu matematiku i elektroniku, Beograd, branko.vujatovic@vs.rs, 0009-0008-9580-340X
[3] Centar za primenjenu matematiku i elektroniku, Beograd, darko.grubac@vs.rs
[4] Centar za primenjenu matematiku i elektroniku, Beograd, nenad.m.stojanovic@vs.rs, 0000-0001-9328-5348

Sažetak: *U radu je predstavljena uporedna analiza operativnih sistema Windows i Linux sa aspekta bezbednosti, u cilju razmatranja njihovih prednosti i nedostataka sa stanovišta primene u lokalnoj računarskoj mreži. Razmatrani su pouzdanost zaštite korisničkih podataka, kontrola ažuriranja i rizici od zlonamernih i ransomware virusa. Analiza obuhvata osnovne razlike u strukturi ova dva sistema, kontrolu pristupa i korisnička prava, ažuriranje i odgovor na kvarove, stabilnost i bezbednost. Prikazan je pregled značajnih sajber napada i njihovih efekata na dva razmatrana operativna sistema. Ustanovljene su razlike u broju napada, kontroli pristupa i mehanizmima odgovora na pretnje. Na ovaj način mogu se odrediti smernice za izbor operativnog sistema u skladu sa specifičnim potrebama i bezbednosnim zahtevima lokalne računarske mreže.*

Ključne reči: *Operativni sistem, Windows, Linux, lokalna računarska mreža, bezbednost, računarska infrastruktura.*

Abstract: *The paper presents a comparative analysis of the Windows and Linux operating systems from the aspect of security, with the aim of considering their advantages and disadvantages from the standpoint of application in a local computer network. The reliability of user data protection, update control, and risks from malicious and ransomware viruses are considered. The analysis includes the basic differences in the structure of these two systems, access control and user rights, updating and response to failures, stability, and security. An overview of significant cyberattacks and their effects on the two considered operating systems is presented. Differences in the number of attacks, access control, and mechanisms of response to threats have been established. In this way, guidelines can be determined for the choice of operating system in accordance with the specific needs and security requirements of the local computer network.*

Keywords: *Operating system, Windows, Linux, local computer network, security, computer infrastructure.*

DRAFT VERZIJA

1. UVOD

Operativni sistemi (OS), kao što su *Windows*, *Linux* i *Mac*, su osnovni tipovi softvera koji omogućavaju komunikaciju između korisnika i računara. *Windows*, *Linux* i *Mac* razlikuju se u nizu karakteristika, kao što su na primer bezbednosni aspekti prva dva sistema (Đorđević, Pleskonjić, Maček, 2004). Bezbednost, ključna u digitalnom svetu, ogleda se u zaštiti ličnih podataka od krađe i zloupotrebe, sprečavanju finansijske štete, održavanju poverenja između korisnika i klijenata, neprekidnosti u radu, zaštiti nacionalne bezbednosti, itd.

Da bi jedna organizacija uspešno funkcionisala, neophodno je da računarska mreža koju koristi bude pouzdana. U ovom radu je sprovedeno istraživanje s ciljem preporuke izbora OS koji omogućava bolju zaštitu podataka od malvera (engl. *Malware*), virusa i neovlašćenog pristupa, kao i veću pouzdanost i stabilnost u radu lokalne računarske mreže. (Đorđević, Pleskonjić, Maček, 2005).

Rad je organizovan na sledeći način. U drugom poglavlju razmatran je pristup izvornom kodu i ključnim razlikama u arhitekturi ova dva OS. Pored toga, u okviru poglavlja analizirana je kontrola pristupa, kao i

sistemi ažuriranja. Treće poglavlje opisuje prednosti i nedostatke *Windows* i *Linux* distribucija, dok su četvrtom poglavlju prikazani podaci o napadima na date elemente. Peto poglavlje je zaključak rada.

2. STRUKTURA LINUX I WINDOWS OPERATIVNOG SISTEMA

Jedna od osnovnih razlika između *Linux* i *Windows* operativnog sistema je u pristupu izvornom kodu. *Windows* je komercijalni operativni sistem zatvorenog koda, gde kontrolu nad njim ima kompanija *Microsoft*. Zahteva plaćenu licencu za korišćenje. On nudi manje opcija prilagođavanja i smanjena je mogućnost nezavisne provere bezbednosti. Za razliku od OS *Windows*, *Linux* je besplatan *open-source* operativni sistem, tj. njegov izvorni kod je dostupan javnosti. Iz tog razloga, korisnici mogu da ga modifikuju i prilagođavaju sopstvenim potrebama. Programeri širom sveta mogu da mu pristupe, analiziraju ga, usavršavaju i otkrivaju potencijalne ranjivosti. Dakle, *Linux* je fleksibilniji OS i lako se može modifikovati, dok *Windows* ima veću podršku kada je reč o širokom spektru aplikacija (True-False Hosting, 2025).

Arhitektura OS je način na koji su njegove komponente međusobno povezane i organizovane. Od odabira arhitekture zavise performanse, fleksibilnost i pouzdanost operativnog sistema. *Windows* koristi hibridnu arhitekturu koja spaja monolitno jezgro, koje je brzo i podržava drajvere, i mikrojezgro, koje je stabilno i sigurno za osnovne funkcije. Sve komponente su povezane i rade unutar jezgra, što može otežati održavanje i ispravljanje grešaka, jer problem u jednom delu može uticati na ceo sistem. Mikrojezgro pomaže da sistem bude sigurniji jer osnovne funkcije rade odvojeno, ali to može usporiti rad zbog komunikacije između delova. Zbog toga *Windows* hibridni sistem uspešno usklađuje brzinu i sigurnost, ali to dovodi do veće složenosti pri njegovom održavanju. *Linux* ima modularnu arhitekturu zasnovanu na monolitnom jezgru koje omogućava dinamičko učitavanje modula kernela. Dakle, jezgro, drajveri, korisnički alati i servisi su međusobno odvojeni, pa se mogu učitavati, zameniti ili ukloniti po potrebi. To omogućava bolju stabilnost, jednostavnije održavanje i veću bezbednost. Sistemi sa ovakvom arhitekturom su fleksibilniji za konfigurisanje, posebno kada je reč o serverima i mrežnom okruženju (Mustapić, 2024).

2.1. Kontrola pristupa

Kontrola pristupa predstavlja način na koji OS ograničavaju pristup resursima samo na ovlašćene korisnike ili programe, u cilju zaštite (Stallings, 2018).

Windows i *Linux* primenjuju osnovne modele kontrole pristupa, sa razlikama u implementaciji. *Windows* koristi detaljan *Access Control List* (*ACL*) model za preciznu kontrolu pristupa fajlovima i resursima, kombinujući *Discretionary Access Control (DAC)*, *Role-Based Access Control (RBAC)* i *Mandatory Integrity Control (MIC)* za veću sigurnost. *Linux* primarno koristi jednostavan *UNIX DAC* model sa tri nivoa dozvola, ali nudi i dodatne mehanizme kao što su *ACL* i sigurnosni moduli (*SELinux, AppArmor*) za strožu kontrolu pristupa.

Po Stallingsu, glavna razlika je u fleksibilnosti i načinu upravljanja: *Windows* koristi grafičke alate i *Active Directory*, dok *Linux* uglavnom zavisi od komandne linije. *Windows* sistem može biti složen za administraciju zbog velikog broja pravila, dok *Linux* zahteva dodatno znanje za korišćenje sigurnosnih modula. Dakle, preciznija i detaljnija kontrola pristupa karakteristična je za *Windows*, dok *Linux* nudi jednostavan osnovni model sa mogućnostima za dodatnu kontrolu, pa izbor zavisi od potreba korisnika i složenosti sistema

2.2. Ažuriranja

Windows ima centralizovani sistem ažuriranja, u okviru kod kompanija *Microsoft* redovno objavljuje bezbednosna ažuriranja, dok se u slučaju otkrivanja kritičnih ranjivosti mogu objaviti i vanredne nadogradnje. Zbog toga korisnici moraju da instaliraju nove verzije koje često nisu kompatibilne mađusobno. Iako *Windows* automatski instalira većinu ažuranja, za neka od njih je potrebno restartovati računar, što može uticati na privremeni prekid rada korisnika. Iako *Microsoft* ima veliki broj stručnjaka za bezbednost, zatvorenost koda onemogućava nezavisnim programerima pristup i eventualno otklanjanje ranjivosti. Bez adekvatnih mera zaštite, korisnici su podložni bezbednosnim pretnjama.

S obzirom na to da je *Linux* otvorenog koda i snažne zajednice programera, propusti koji se tiču bezbednosti se često otkrivaju i saniraju. Neke od distribucija imaju sopsvene bezbedonosne timove koji brzo izdaju ažuriranja. Korisnici često imaju veću kontrolu ažuriranja sistema. Kod operativnog sistema *Linux* mogu se selektivno ažurirati samo određene komponente, što povećava efikasnost. Dakle, to se može uraditi bez ponovnog pokretanja sistema (True-False Hosting, 2025).

3. WINDOWS I LINUX DISTRIBUCIJE

Windows operativni sistemi su tokom razvoja prošli kroz niz verzija. Jedna grana je od *Windows* 1.0 do *Windows Milenium Edition* - koji su nastali i bili kao grafičko okruženje za MS-DOS. Druga grana počinje sa *Windows* 3.1 NT i završava se sa *Windows* 11, trenutno. Takođe bi trebalo pomenuti *Windows* (NT) *Server* jer je inicijalno *Windows* 3.1 NT nastao kao OS za servere i radne stanice, te je sada aktuelna verzija *Windows Server* 2025. U korporativnom okruženju, u okviru lokalne računarske mreže *Windows Server* je najčešći izbor.

Svaka od pomenutih verzija sa sobom nosi značajna unapređenja, ali i poteškoće sa kojima se korisnici i administratori moraju nositi. Tokom godina je došlo do poboljšanja korisničkog iskustva, povećanja stabilnosti i bolje podrške za hardver i softver. Ipak, verzije su podložne sigurnosnim propustima, što uzrokuje potrebu za redovnim dopunama i ažuriranjima. Ipak, *Windows* OS se kontinuirano razvija i prilagođava novim zahtevima korisnika i tehnološkim inovacijama. U tabeli 1 prikazane su prednosti i nedostaci nekoliko poslednjih verzija operativnog sistema *Windows* (Mustapić, 2024).

Linux distribucija je kompletan operativni sistem zasnovan na kernelu, zajedno sa softverom i sistemima za upravljanje paketima. Zvanično, naziv za koji se zalaže Free Software Foundation (FSF), koji stoji iza GNU projekta je GNU/*Linux* distribucija. Kod nekih distribucija postoji kao zaseban proizvod serverska instalacija, dok kod drugih je moguće izabrati, tokom instalacije, skup paketa koji se odnose na serversku ili desktop varijantu. Kako je *Linux* samo jezgro OS, koje je *Google* izabrao kao zvanično jezgro za *Android* OS, izdvaja se i *Android* (ChromeOS)/*Linux* distribucija.

Svaka distribucija ima posebne pakete i sisteme za instalaciju i ažuriranje programa, namenjena različitim korisnicima kao što su početnici, programeri ili administratori. Distribuciju treba birati u zavisnosti od potrebe. *Fedora* je prilagođena programerima i onima koji žele da testiraju inovacije. *Red Hat Enterprise* se koristi u poslovnim okruženjima i pruža visok nivo sigurnosti i podrške. *Debian* je jedna od najstarijih i najpoznatijih distribucija *Linux* OS i na njemu su zasnovane mnoge druge distribucije. Poznat je po svojoj pouzdanosti i stabilnosti što ga čini pravim izborom za administratore, napredne korisnike i organizacije. U lokalnim računarskim mrežama, koje zahtevaju visoku bezbednost i stabilnost, *Debian* je pogodna distribucija. U tabeli 2 prikazane su prednosti i nedostatke nekoliko popularnih verzija *Linux* OS (Mustapić, 2024).

Tabela 1: Prednosti i nedostaci verzija operativnog sistema *Windows*

Verzije *Windows*	Godina	Prednost	Nedostatak
Windows 7	2009	Kombinacija dobrog izgleda i performansi	Zastarelost u bezbednosnom smislu
Windows 8	2012	Bolja sigurnost, brže pokretanje sistema, optimizacija za nove uređaje	Neuobičajen korisnički interfejs
Windows 8.1	2013	Poboljšano korisničko iskustvo	Nije u dovoljnoj meri prihvaćeno od strane korisnika
Windows 10	2015	Široka primenjivost i integracija	Ažuriranja i privatnost
Windows 11	2021	Moderan dizajn, bolje korisničko iskustvo	Zahteva noviji hardver

Tabela 2: Distribucije *Linux* operativnog sistema

Popularne distribuciije *Linux* operativnog sistema	Godina	Prednost	Nedostatak
Debian	1993	Pouzdanost i stabilnost	Sporiji tempo izdavanja i manja podrška za najnoviji hardver i softver
Red Hat Enterprise	2000	Pouzdanost i podrška, izuzetan za poslovne aplikacije	Visoka komercijalna cena
Fedora	2003	Inovativnost i fokusiranje na najnovije tehnologije	Brži tempo izdavanja i manja stabilnost
CentOS	2004	Stabilnost i pouzdanost, dugotrajna podrška	Sporiji tempo izdavanja novih verzija i manje ažuriranja softvera
Ubuntu	2004	Jednostavnost upotrebe i podrška zajednice	Ograničena prilagodljivost za neke napredne korisnike

DRAFT VERZIJA

4. NAPADI NA WINDOWS I LINUX DISTRIBUCIJE

U skladu sa porastom *web* aplikacija i usluga, porastao je i broj napada na OS. Oni predstavljaju velike bezbednosne rizike za organizacije koje se oslanjaju na digitalnu infrastrukturu. Ugrožene su kako aplikacije, jer ranjivosti na tom nivou mogu dovesti u opasnost poverljive podatke, tako i mreže, gde pretnje mogu dovesti do preopterećenja sistema i onemogućavanja pristupa legitimnim korisnicima.

Malver, odnosno zlonamerni softver, uključuje različite programe koji imaju za cilj izazivanje štete, krađu podataka ili narušavanje integriteta sistema. U malvere spadaju crvi, trojanci i špijunski softver. Ransomver (engl. *ransomware*) je posebno štetna vrsta zlonamernog softvera koji funcioniše tako što šifruje podatke korisnika i zahteva otkupninu za dešifrovanje. Ova pretnja je postala jedna od najznačajnijih pretnji u oblasti sajber bezbednosti u poslednje vreme (Yaddala, 2024).

Prikupljanjem dostupnih podataka o napadima na *Windows* i *Linux* distribucije analizirani su značajniji napadi. U tabeli 3 su navedeni karakteristični napadi na *Windows* distribuciju prema godini dešavanja i posledicama.

Pregled napada prema godini i posledicama na *Linux* distribucije dat je u tabeli 4.

Analiza prikupljenih podataka o napadima ukazuje na to da je *Windows* češća meta napada. Najčešće su napadnuti *Word*, *Excel* i *PowerPoint* dokumenti (korisnici aktiviraju malver prilikom otvaranja), zatim *e-mail* poslovne komunikacije, daljinski pristup (posebno su ranjivi sistemi sa slabim lozinkama i otvorenim portovima) itd. Najčešći napadi kod OS *Linux* se ogledaju u ranjivosti servisa koji su izloženi mreži, loše konfiguracije sistema (*root* pristup bez lozinke), neažuriranju softvera i otvorenih portova koji nisu zaštićeni.

Tabela 3: Napadi na *Windows* distribuciju

Tip i naziv napada	Godina	Posledica
Ransomware WannaCry (Europol, n.d.)	2017	Šifrovanje podataka (za otključavanje podataka traži se otkup)
Wiper NotPetya (Cisco Talos Group, n.d.)	2017	Uništavanje podataka (gubitak podataka)
Supply chain SolarWinds (Nacionalni CERT Republike Srbije, 2020)	2020	Pristup državnim mrežama (Zlonamerni softver je ubačen u legitimno ažuriranje softvera. Hakeri su na taj način krali podatke o klijentima i špijunirali druge organizacije)
Trojanac *Emotet* (Europol & Eurojust, 2021)	2018-2021	Pristup mrežama, priprema za ransomware (slanje *e-mail* sa zaraženim *Word* i *Eksel* prilozima)
Zero-day (Abrams, 2021)	2021	Izvršavanje zlonamernog koda
Office zero-day RCE Follina (Abrams, 2022)	2022	Krađa podataka
Supply chain/ Napadi na Exchange servere (Microsoft, 2022)	2022+	Ugrožavanje *e-mail* naloga

Tabela 4: Napadi na *Linux* distribucije

Tip i naziv napada	Godina	Posledica
Remote Code Execution Shellshock (CVE-2014-6271) (Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, n.d.)	2014 +	Omogućava napadaču da daljinski izdaje komande na server, masovni upadi na servere
Dirty COW (CVE-2016-5195) (Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, n.d.)	2016	Preuzimanje *root* privilegija
Thunderspy (Ruytenberg, 2020)	2020	Preko otvorenih nezaštićenih portova omogućava fizički pristup bez lozinke
XZ backdoor (CVE-2024-3094) (National Institute of Standards and Technology, n.d.)	2024	Izmena sadržaja datoteka .xz radi diskretnog pristupa SSH autentikacije-*Red Hat Enterprise Linux*

DRAFT VERZIJA

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize, koja uključuje razlike u strukturi OS *Windows* i *Linux*, obuhvata prednosti i nedostatke njihovih distribucija i posledice zabeleženih napada, a prema uslovima gde brzina procesa rada nije ključna za izbor OS, mogu se izvesti određeni zaključci.

Iz svega navedenog proizilazi da je *Linux* bolji izbor od *Windows* operativnog sistema kada je reč o stabilnosti i bezbednosti. Dalje, katakteristike ga čine dobrim izborom za programere, mrežne administratore, servere i organizacije sa visokim zahtevima za zaštitu podataka.

Kada je reč o prosečnim i poslovnim korisnicima, *Windows* je bolja opcija zbog svoje jednostavnosti, podrške za veliki broj aplikacija i široke kompatibilnosti hardvera i softvera. Takođe, na osnovu zabeleženih napada i ranjivosti može se reći da je *Windows* više pogođen zbog svoje kompleksnije arhitekture i oslonca na širok spektar eksternih aplikacija i servisa.

Na osnovu potrebe za sigurnošću i bezbednošću zaštite podataka u lokalnoj računarskoj mreži, kao dobar izbor nameće se instalacija *Linux* distribucije (korišćen je *Debian* 12) na serveru i radnim stanicama.

Kao smernica za budući rad, preporučuje se dalje istraživanje i primena Linux radnog okruženja, imajući u vidu pozitivna iskustva tokom dvogodišnjeg korišćenja bez zabeleženih problema, za razliku od *Windows* okruženja u kojem su registrovani incidenti sa gubitkom podataka i prekidima u radu hardvera.

U daljem radu planira se povezivanje dve *offline* lokalne mreže radi merenja protoka i stabilnosti rada na proširenom sistemu, kao i proces testiranja napada na računarsku infrastrukturu u različitim uslovima.

LITERATURA

Abrams, L. (2021, 2. mart). *Microsoft fixes actively exploited Exchange zero-day bugs, patch now*. BleepingComputer. https://www.bleepingcomputer.com/news/security/microsoft-fixes-actively-exploited-exchange-zero-day-bugs-patch-now/ (pristupljeno: 26.06.2025.)

Abrams, L. (2022, 27. jun). *Microsoft patches actively exploited 'Follina' Windows zero-day* [News article]. BleepingComputer. https://www.bleepingcomputer.com/news/security/microsoft-patches-actively-exploited-follina-windows-zero-day/ tech.co+6darkreading.com+6reddit.com+6

Cisco Talos Group. (n.d.). *Worldwide ransomware variant* [Blog post]. Cisco Talos Blog. https://blog.talosintelligence.com/worldwide-ransomware-variant (pristupljeno: 26.06.2025.)

Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (n.d.). *Known Exploited Vulnerabilities Catalog*. CISA. https://www.cisa.gov/known-exploited-vulnerabilities-catalog?search_api_fulltext=linux&field_date_added_wrapper=all&field_cve=&sort_by=field_date_added&items_per_page=20&url=&page=1 (pristupljeno: 26.06.2025.)

Đorđević, B., Pleskonjić, D., & Maček, N. (2005). Operativni sistemi: teorija, praksa i rešeni zadaci, Mikro knjiga

Đorđević, B., Pleskonjić, D., & Maček, N. (2004). *Operativni sistemi: koncepti*. Viša elektrotehnička škola, Beograd.

Europol & Eurojust. (2021, 27 January). *World's most dangerous malware EMOTET disrupted through global action* [Press release]. Europol. https://www.europol.europa.eu/media-press/newsroom/news/world%E2%80%99s-most-dangerous-malware-emotet-disrupted-through-global-action (pristupljeno: 26.06.2025.)

Europol. (n.d.). *WannaCry ransomware*. Europol. https://www.europol.europa.eu/wannacry-ransomware (pristupljeno: 26.06.2025.)

Microsoft. (2022, September 30). *Analyzing attacks using the Exchange vulnerabilities CVE-2022-41040 and CVE-2022-41082*. Microsoft Security Blog. https://www.microsoft.com/en-us/security/blog/2022/09/30/analyzing-attacks-using-the-exchange-vulnerabilities-cve-2022-41040-and-cve-2022-41082/ (pristupljeno: 26.06.2025.)

Mustapić, M. (2024). Komparativna analiza Windows i Linux operacijskih sustava, (Doctoral dissertation, Šibenik University of Applied Sciences).

Nacionalni CERT Republike Srbije. (2020, 25. decembar). Napad na kompaniju SolarWinds. Nacionalni CERT Republike Srbije. https://www.cert.rs/rs/obavestenje/591-Napad-na-kompaniju-SolarWinds.html (pristupljeno: 26.06.2025.)

National Institute of Standards and Technology. (n.d.). *CVE-2024-3094*. NVD – National Vulnerability Database. https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2024-3094

PRAVI PUTEVI

Ruytenberg, B. (2020). *Thunderspy: When Lightning Strikes Thrice: Breaking Thunderbolt 3 Security* [Web page]. Thunderspy.io. https://thunderspy.io/ (pristupljeno: 26.06.2025.)

Stallings, W. (2018). *Operating Systems: Internals and Design Principles* (9th ed., Global Edition). Pearson Education.

True-False Hosting. (2025, mart). *10 osnovnih razlika između Windows-a i Linux-a.* True-False Hosting. https://truefalsehosting.rs/blog/razlika-windows-i-linux

Yaddala, M. N. K., & Sunkara, Y. R. (2024). Comprehensive survey of web security threats in 2024. Journal of Cybersecurity Research, 15(2), 123–145.

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

ANALIZA RIZIKA U IMPLEMENTACIJI ERP SISTEMA

ŽELJKO SPASENIĆ[1], NEMANJA MILANOVIĆ[2], MILOŠ MILOSAVLJEVIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, zeljko.spasenic@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-5219-6461
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, nemanja.milanovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-8526-6932
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, milos.milosavljevic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-4965-4676

Rezime: *U ovom radu su analizirani rizični događaji koji mogu uticati na uspeh implementacije ERP sistema. Istraživanje je obuhvatilo 10 rizičnih događaja koji su analizirani korišćenjem matrice rizika. Rezultati istraživanja pokazuju da su najznačajniji rizični događaji povezani sa neuspehom u koordinaciji i izvršenju različitih aktivnosti i radnih zadataka tokom procesa implementacije. Za najznačajnije identifikovane rizične događaje predložene su korektivne akcije.*

Ključne reči: *ERP implementacija, Matrica rizika, Upravljanje rizicima, Upravljanje promenama*
Abstract: *This paper analyzes risk events that may affect the successful implementation of Entrerprise Resource Planing (ERP) systems. The study examines ten specific risk events using a risk matrix methodology. The research findings indicate that the most significant risk events are associated with failures in the coordination and execution of various activities and tasks during the implementation process. For the highest-priority risk events, appropriate corrective actions are proposed to mitigate their potential impact.*

Keywords: *ERP implementation, Risk matrix, Risk management, Change management*

1. UVOD

ERP (engl. *Enterprise Resource Planning*) sistemi su složena softverska rešenja za upravljanje poslovnim aktivnostima i procesima u različitim organizacijama i privrednim subjektima. Osnovna funkcija ERP sistema je efikasna integracija poslovnih aktivnosti i procesa koje su u nadležnosti različitih poslovnih funkcija kao što su nabavka, proizvodnja, prodaja, finansije i ljudski resursi. ERP je efikasno informatičko rešenje razvijeno sa ciljem kreiranja zajedničke baze podataka o poslovanju preduzeća. Na ovaj način ERP sistemi potencijalno omogućavaju veću troškovnu efikasnost, tačnost i brzinu u donošenju poslovnih odluka, uz stvaranje pouzdane osnove za analizu rezultata poslovanja preduzeća u prošlosti i pouzdanije predviđanje budućnosti (Menon, 2019; Spasenić et al., 2020).

Implementacija ERP sistema ima značajan uticaj na organizacionu transformaciju, jer podrazumeva ne samo tehničku implementaciju, već i redizajn u poslovnim procesima i načinu obavljanja radnih zadataka. Uspeh ERP implementacije u velikoj meri zavisi od strateške podrške menadžmenta, kvaliteta projektne dokumentacije, spremnosti i sposobnosti zaposlenih da se prilagode novim načinima rada.

U postojećoj naučnoj literaturi ERP sistemi se često analiziraju kroz prizmu njihove isplativosti (Chang & Hsu; 2017), uticaja na performanse preduzeća (Schlichter et al., 2020, Wulan et al. 2024), kao i izazova u njihovom uvođenju, uključujući tehničke, organizacione i ljudske faktore (Spasenić et al., 2020; Firdaus et al., 2024). Pored toga, sve veći značaj dobijaju i pitanja vezana za održivost ERP rešenja (Anjaria, 2024) i ulogu ERP-a u digitalnoj transformaciji preduzeća (Mandava, 2024). Iako ERP sistemi donose brojne koristi, proces njihove implementacije je složen, skup i rizičan zbog čega mora biti zasnovan na pažljivom planiranju, kvalitetnoj obuci korisnika i kontinuiranom upravljanju promenama.

U poslednje dve decenije, implementacija ERP sistema prepoznata je kao složen i rizičan proces koji često ne ispunjava očekivanja organizacija. Rezultati istraživanja Barker & Frolick (2003) potvrđuju da neuspešna ERP implementacija često proizlazi iz nedovoljno razvijene strategije za upravljanje promenama, loše obuke korisnika i ograničene podrške ili nedovoljne zainteresovanosti i uključenosti menadžmenta preduzeća u proces implementacije. Na sličan način ali u kontekstu visokog obrazovanja, Rizkiana et al. (2021) identifikuju faktore uspeha ERP implementacije koji uključuju podršku menadžmenta, korisničku obuku i izbor odgovarajućeg ERP sistema koji obezbeđuje funkcionalnosti u skladu sa potrebama organizacije. Alavi et al. (2021) predlažu primenu liste usklađenih ciljeva (engl. Balanced Scorecard) u cilju

DRAFT VERZIJA

identifikacije i prioritizacije različitih rizika, pružajući kvantitativni okvir za upravljanje ERP projektima koji omogućava bolje donošenje odluka tokom implementacije.

Coşkun et al. (2022) su identifikovali ključne faktore koji mogu dovesti do neuspeha implementacije ERP sistema kroz analizu više od 160 naučnih radova. Autori klasifikuju individualne rizike u grupe kao što su tehnička složenost, interni otpor promenama i ljudski faktori, čime doprinose boljem razumevanju interakcije između tehnologije i organizacionih procesa. Kada je reč o malim preduzećima, Svensson & Thoss (2021) ističu da su ova preduzeća izložena specifičnim rizicima kao što su ograničeni resursi i nedostatak internih kompetencija, što dodatno usložnjava proces implementacije ERP rešenja.

Izazovi nakon implementacije ERP sistema postaju značajna tema u novijim radovima. Mahmood et al. (2023) ističu da organizacije nakon implementacije ERP sistema često nailaze na probleme održavanja postojećih i razvoja novih funkcionalnosti, otpora korisnika i neusklađenosti poslovnih procesa i načina rada ERP sistema. Slično navedenom, Singh et al. (2022) na primeru sektora farmacije su identifikovali izazove u vezi sa prilagođavanjem ERP sistema izmenama u zakonskim propisima i kontinuiranim promenama u lancu snabdevanja.

Imajući u vidu kompleksnost implementacije ERP sistema kao i veliki broj rizika kojima je proces implementacije izložen, cilj istraživanja je analiza potencijalno negativnog uticaja najznačajnijih rizika na uspeh implementacije. Nakon uvodnog, u drugom poglavlju ovog rada opisan je korišćeni metodološki pristup, a u trećem poglavlju predstavljeni rezultati istraživanja i preporuke za umanjenje rizika. Četvrto, ujedno i završno poglavlje rada sadrži zaključna razmatranja i preporuke za buduća istraživanja.

2. METODOLOGIJA

U ovom radu je analizirano deset rizičnih događaja. Polazna osnova za identifikovanje rizičnih događaja koji su predmet analize je istraživanje Baykasoğlu & Gölcük (2017), u kome je analizirano 8 rizičnih događaja. Dodatna dva događaja identifikovana su kroz intervjue sa domenskim ekspertima koji su učestvovali u istraživanju. U istraživanju je učestvovalo pet eksperata sa višegodišnjim iskustvom u implementaciji ERP sistema. Eksperti su, korišćenjem Likertove skale od 1 do 5, ocenili verovatnoću nastanka rizika (1 – niska verovatnoća; 5 – visoka verovatnoća) i uticaj na uspeh implementacije (1 – zanemarljiv negativan uticaj; 2 – izuzetno negativan uticaj). Rizici koje su eksperti ocenjivali opisani su u tabeli 1.

Tabela 1: Rizični događaji

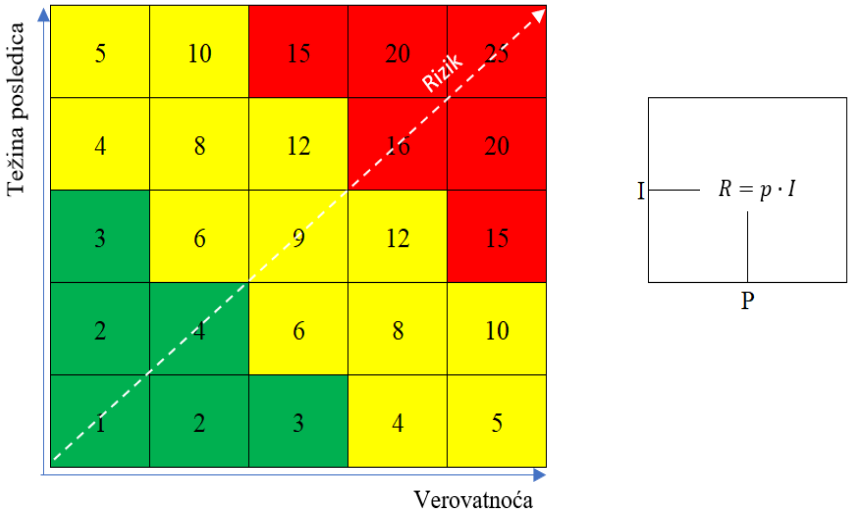
Događaj	Način neuspeha	Uzroci neuspeha	Posledice neuspeha
RD1	Neuspeh u redizajniranju poslovnih procesa klijenta u skladu sa načinom rada ERP-a	Neadekvatan program upravljanja promenama, nedovoljna analiza zahteva korisnika, nedovoljna obuka i znanje korisnika	Prekoračenje budžeta i vremenskog okvira, loši finansijski rezultati
RD1	Neuspeh u radu tima implementatora	Nedostatak iskustva članova tima u planiranju i rešavanju problema, neadekvatna formacija tima	Loš timski učinak
RD3	Neuspeh u radu tima klijenta	Nedostatak iskustva članova tima u planiranju i rešavanju problema, neadekvatna formacija tima	Loš timski učinak
RD4	Neuspeh u obezbeđivanju podrške top menadžmenta klijenta	Nejasni strateški ciljevi, nedostatak liderskih sposobnosti, nedovoljni resursi i znanje	Loši poslovni rezultati, slaba usklađenost sa strateškim ciljevima
RD5	Neuspeh u razvoju funkcionalnosti u skladu sa zahtevima korisnika	Neefikasan softverski inženjerski tim, nedostatak obuke, loša komunikacija, nejasni ciljevi	Nedovoljna pouzdanost i stabilnost sistema, nizak stepen integracije
RD6	Neuspeh u obezbeđivanju integracije između različitih softvera/aplikacija klijenta	Neadekvatan program upravljanja promenama, nedovoljna obuka konsultantske firme, nedostatak zajedničkog razumevanja među odeljenjima	Kašnjenje projekta, nizak stepen fleksibilnosti, nedovoljna stabilnost sistema
RD7	Neuspeh u razumevanju i reagovanju na promene u zahtevima korisnika	Neadekvatno liderstvo, neefikasan sistem planiranja i dizajniranja korisničkih zahteva	Slaba usklađenost sa strateškim ciljevima, nizak stepen fleksibilnosti, loši rezultati
RD8	Neuspeh u saradnji sa ključnim korisnicima klijenta	Nedovoljna obuka, neefikasna komunikacija	Niska prilagođenost korisnicima, loši poslovni rezultati

DRAFT VERZIJA

RD9	Neuspeh u upravljanju projektom (loš project management)	Neadekvatno liderstvo, neodgovarajuća upotreba alata za upravljanje projektima, neefikasna komunikacija	Prekoračenje budžeta i vremenskog okvira
RD10	Neuspeh u razvoju projektne dokumentacije	Nedovoljno jasna korisnička uputstva	Niska prilagođenost korisnicima, česte greške u radu

Matrica rizika predstavlja često korišćeni alat u procesu analize, procene i upravljanja rizicima u različitim oblastima. Matrica rizika je stekla svoju široku upotrebu u teoriji i praksi zahvaljujući svojoj jednostavnosti i razumljivosti koja omogućava da se na vizuelan način prikažu rizici u različitim oblastima. Kao metod koji objedinjuje kvalitativne i kvantitativne pristupe, matrica rizika omogućava procenu i kategorizaciju rizičnih događaja u odnosu na dve osnovne dimenzije: verovatnoću nastanka i ozbiljnost posledica (Spasenic et al., 2022).

Proces primene matrice rizika počinje identifikacijom potencijalnih rizičnih događaja. Za svaki događaj procenjuje se verovatnoća (p) i očekivani uticaj, odnosno težina posledica (I). Ukupni rizik (R) se dobija kao proizvod verovatnoće i očekivanog uticaja odnosno $R = p \times I$. Na osnovu verovatnoće nastanka i očekivane težine posledica, analizirani događaji se pozicioniraju unutar matrice rizika. Standardna matrica rizika se može prikazati u formi tabele dimenzija 5×5 odnosno sa 25 polja (Spasenić & Makajić-Nikolić, 2023). Matrica rizika je prikazana na slici 1.



Slika 1: Matrica rizika i pozicioniranje rizičnih događaja (Spasenić & Makajić-Nikolić, 2023)

Vertikalna osa matrice prikazuje težinu posledica, a horizontalna prikazuje verovatnoću. Ako se vrednosti za ocenu rizičnih događaja kreću u intervalu od 1 do 5, onda ocena 1 označava minimalnu, a ocena 5 označava maksimalnu vrednost za obe dimenzije. Ako posmatramo verovatnoću nastanka rizičnog događaja, vrednost p = 1 odgovara veoma maloj, zanemarljivoj verovatnoći, a p = 5 predstavlja skoro izvestan nastanak rizičnog događaja. Slično objašnjenje važi i za ocene težine posledica događaja. Ako je I = 1 radi se o događaju sa beznačajnim posledicama, a I = 5 ukazuje na potencijalno kritične posledice događaja. Na osnovu izračunatog rizika, događaji se kategorizuju u tri zone:

- zelenu, koja obuhvata događaje sa niskim rizikom nastanka i zanemarljivim posledicama, a koji su prihvatljivi bez značajnije intervencije,
- žutu, obuhvata događaje sa srednjim rizik nastanka i umerenim posledicama za koje je potrebna dodatna procena i predlog korektivnih akcija ako se rizik ne može tolerisati i
- crvenu zonu, koja obuhvata događaje sa visokim rizikom nastanka i kritičnim posledicama zbog kojih je neophodna hitna intervencija ili obustava aktivnosti.

Matrica rizika se primenjuje kao osnov za donošenje odluka, definisanje prioriteta i korektivnih akcija u procesu upravljanja rizicima u različitim oblastima, od IT projekata i proizvodnje, do upravljanja ljudskim resursima i implementacije ERP sistema.

3. ISTRAŽIVANJE I REZULTATI

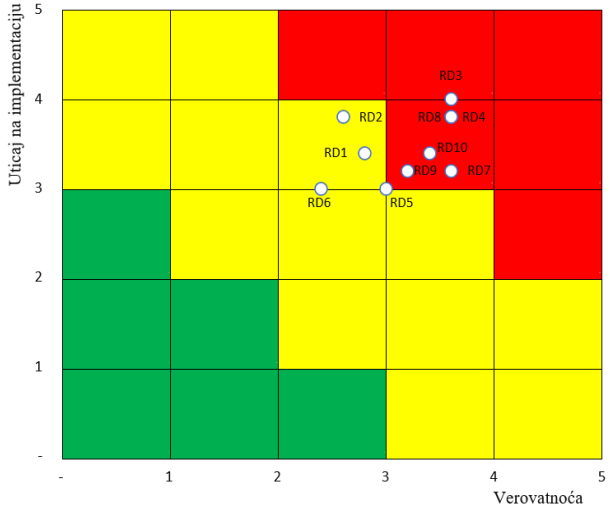
Prosečene ocene eksperata za verovatnoću rizičnih događaja (p) i procenjeni uticaj na uspeh implementacije ERP rešenja (I) izračunate su korišćenjem proste aritmetičke sredine na osnovu pojedinačnih

ocena eksperata za svaki rizični događaj. Ukupan rizik (R) izračunat je kao proizvod prosečnih ocena za p i I. Rezultati su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2: Ocene rizičnih događaja

Događaj	p	I	$R = pxI$
RD1	2,80	3,40	9,52
RD2	2,60	3,80	9,88
RD3	3,60	4,00	14,40
RD4	3,60	3,80	13,68
RD5	3,00	3,00	9,00
RD6	2,40	3,00	7,20
RD7	3,60	3,20	12,52
RD8	3,60	3,80	13,68
RD9	3,20	3,20	10,24
RD10	3,40	3,40	11,56

Na osnovu izračunatih vrednosti događaji su pozicionirani u matrici rizika (Slika 2).



Slika 2: Matrica rizika za analizirane događaje

Matrica rizika pokazuje da se veći broj rizičnih događaja nalazi u crvenoj zoni matrice rizika, koja obuhvata oblasti sa visokom verovatnoćom nastanka i veoma negativnim uticajem na uspeh implementacije ERP sistema. Crvena zona ukazuje na visok nivo rizika šest rizičnih događaja kojima je potrebno pravovremeno i adekvatno upravljati. Posebno se izdvajaju rizični događaji RD3, RD4 i RD8, koji imaju najnepovoljniju kombinaciju ocena, što ih čini kritičnim događajima za uspešnu implementaciju ERP sistema u organizaciji.

Nasuprot tome, nijedan od rizičnih događaja nije lociran u zelenoj zoni matrice, što znači da nema događaja sa niskom verovatnoćom i malim uticajem na uspeh implementacije, odnosno da svi identifikovani rizici predstavljaju potencijalnu pretnju koja zahteva pažnju. Rizični događaji RD6, RD1 i RD2 nalaze se u žutoj zoni, karakterističnoj za srednji nivo rizika. Njihove ocene pokazuju nešto nižu verovatnoću i/ili uticaj u odnosu na događaje iz crvene zone, ali se ni oni ne mogu zanemariti. Adekvatno upravljanje rizicima iz crvene i žute zone mora uključiti njihovu detaljnu analizu i procenu kao i primenu korektivnih aktivnosti u zavisnosti od konteksta i dostupnih resursa. Predlog aktivnosti koje doprinose adekvatnom upravljanju rizicima dat je u tabeli 3.

Tabela 3: Predlog aktivnosti za upravljanje rizičnim događajima

Događaj	Opis	Aktivnosti za upravljanje rizikom
RD3	Neuspeh u radu tima klijenta	▪ Analiza spremnosti klijenta za proces implementacije ERP sistema ▪ Adekvatna procena kompetencija ključnih korisnika

DRAFT

		▪ Angažovanje eksternih eksperata
RD4	Neuspeh u obezbeđivanju podrške top menadžmenta klijenta	▪ Definisanje jasnog akcionog plana za proces implementacije ▪ Definisanje jasnih obaveza, nadležnosti i odgovornosti za sve učesnike u procesu implementacije
RD8	Neuspeh u saradnji sa ključnim korisnicima klijenta	▪ Adekvatna procena kompetencija ključnih korisnika ▪ Angažovanje eksternih eksperata
RD10	Neuspeh u razvoju projektne dokumentacije	▪ Alociranje vremena i budžeta za pripremu kvalitetne projektne dokumentacije
RD7	Neuspeh u razumevanju i reagovanju na promene u zahtevima korisnika	▪ Alociranje vremena i budžeta za pripremu kvalitetne projektne dokumentacije i analizu zahteva korisnika ▪ Kvalitetan dizajn funkcionalnosti koje su predmet razvoja na zahtev korisnika ▪ Blagovremen i dovoljno detaljan prikaz funkcionalnosti u ERP sistemu
RD9	Neuspeh u upravljanju projektom (loše upravljanje projektom)	▪ Definisanje jasnog akcionog plana za proces implementacije ▪ Definisanje jasnih obaveza, nadležnosti i odgovornosti za sve učesnike u procesu implementacije ▪ Angažovanje eksternih eksperata ▪ Korišćenje savremenih alata i tehnika za upravljanje projektima
RD5	Neuspeh u razvoju funkcionalnosti u skladu sa zahtevima korisnika	▪ Kvalitetan dizajn funkcionalnosti koje su predmet razvoja na zahtev korisnika ▪ Blagovremen i dovoljno detaljan prikaz funkcionalnosti u ERP sistemu

4. ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja pokazuju da veći broj rizičnih događaja može imati negativan uticaj na uspeh implementacije ERP sistema. Da bi se analizirani rizici ublažili, neophodno je primeniti veći broj korektivnih akcija koje su međusobno povezane. Najznačajnije korektivne akcije su: (*i*) analiza spremnosti klijenta za proces implementacije kompleksnog ERP sistema, (*ii*) adekvatna analiza zahteva korisnika i (*iii*) realna procena budžeta i vremena potrebnog za implementaciju.

Istraživanje ima i određene nedostatke koje je potrebno prevazići u budućim istraživanjima. Prvo, rizici su analizirani samo kroz dve dimenzije, pri čemu je mogućnost blagovremene detekcije rizika i preduzimanja predloženih korektivnih akcija ostala izvan obuhvata analize. Drugo, analiza izostavlja interakciju između rizika koja izvesno postoji, posebno imajući u vidu da određene korektivne akcije omogućavaju uticaj na više od jednog rizičnog događaja. Treće, rizike su analizirali zaposleni u preduzeću čija je osnovna delatnost implementacija ERP sistema, što može imati za rezultat pristrasnost u oceni rizičnih događaja. Rizici povezani sa karakteristikama budućih korisnika su ocenjeni kao najznačajniji, a aktivnosti koje su pod kontrolom implementatora ocenjene su kao manje rizične. Slično istraživanje bi se moglo sprovesti na osnovu odgovora zaposlenih u preduzećima koja su prošla kroz proces implementacije, što bi moglo imati uticaj na rangiranje događaja.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje nije dobilo eksterno finansiranje.

LITERATURA

Alavi, S., Peivandzani, S., & Mirmohammadsadeghi, S. (2021). Risk Assessment and Prioritization of ERP Implementation Based on BSC. *Journal of Human, Earth, and Future, 2*(1), 16–23. https://doi.org/10.28991/hef-2021-02-01-02

Anjaria, K. (2024). Enhancing sustainability integration in Sustainable Enterprise Resource Planning (S-ERP) system: Application of Transaction Cost Theory and case study analysis. *International Journal of Information Management Data Insights*, *4*(2), 100243.

Barker, T., & Frolick, M. N. (2003). ERP Implementation Failure: A Case Study. *Information Systems Management, 20*(4), 43–49. https://doi.org/10.1201/1078/43647.20.4.20030901/77292.7

Baykasoğlu, A., & Gölcük, İ. (2017). Comprehensive fuzzy FMEA model: a case study of ERP implementation risks. Operational Research, 20(2), 795–826. https://doi.org/10.1007/s12351-017-0338-1

DRAFT VERZIJA

Chang, Y.-W., & Hsu, P.-Y. (2017). An empirical investigation of organizations' switching intention to cloud enterprise resource planning: a cost-benefit perspective. Information Development, 35(2), 290–302. https://doi.org/10.1177/0266666917743287

Coşkun, E., Gezici, B., Aydos, M., Tarhan, A. K., & Garousi, V. (2022). ERP failure: A systematic mapping of the literature. *Data & Knowledge Engineering, 142*, 102090. https://doi.org/10.1016/j.datak.2022.102090

Firdaus, T. M., Panduwiyasa, H., & Febriyani, W. (2024). SMEs ERP Readiness Success Factor Framework to Increase Implementation Successful Rate in Developing Countries–a Literature Review. *International Journal of Innovation in Enterprise System*, *8*(2), 22-35.

Mahmood, F., Khan, A. Z., Shah, S. A., & Adil, M. (2023). Post ERP implementation issues and challenges: exploratory case studies in the context of Saudi Arabia. *Kybernetes, 53*(12), 5749–5774. https://doi.org/10.1108/k-06-2022-0914

Mandava, H. (2024). The use of contemporary Enterprise Resource Planning (ERP) technologies for digital transformation. *Journal of Artificial Intelligence and Big Data*, 31-35

Menon, S. (2019). Benefits and Process Improvements for ERP Implementation: Results from an Exploratory Case Study. International Business Research, 12(8), 124. https://doi.org/10.5539/ibr.v12n8p124

Rizkiana, A. K., Ritchi, H., & Adrianto, Z. (2021). Critical Success Factors Enterprise Resource Planning (ERP) Implementation in Higher Education. *Journal of Accounting Auditing and Business, 4*(1), 54–65. https://doi.org/10.24198/jaab.v4i1.31551

Schlichter, J., Klyver, K., & Haug, A. (2020). The moderating effect of ERP system complexity on the growth–profitability relationship in young SMEs. *Journal of Small Business Management*, *59*(4), 601–626. https://doi.org/10.1111/jsbm.12502

Singh, S., Singh, S., & Misra, S. C. (2022). Post-implementation challenges of ERP system in pharmaceutical companies. *International Journal of Quality & Reliability Management, 40*(4), 889–921. https://doi.org/10.1108/ijqrm-10-2020-0333

Spasenić, Ž., Makajić-Nikolić, D. (2023). Procena rizika u projektnom finansiranju obnovljivih izvora energije. Zbornik radova SYM-OP-IS 2023. Medija centar Odbrana. 50. simpozijum o operacionim istraživanjima, Tara 18-21.9.2023. godine [ISBN 978-86-335-0836-0]

Spasenic, Z., Makajic-Nikolic, D., & Benkovic, S. (2022). Integrated FTA-risk matrix model for risk analysis of a mini hydropower plant's project finance. Energy for Sustainable Development, 70, 511–523. https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.024

Spasenić Ž., Milosavljević M., & Benković S. (2020) The Role of ERP in Digital Transformation: A User Perspective. In proceedings of XVII International symposium Symorg 2020 "Business and Artificial Intelligence", Faculty of Organizational Sciences (pp. 700-706)

Svensson, A., & Thoss, A. (2021). Risk Factors When Implementing ERP Systems in Small Companies. *Information, 12*(11), 478. https://doi.org/10.3390/info12110478

Wulan, T. S., Novika, P. W., Nurvianti, E., & Putra, F. A. (2024). Impact of ERP System Implementation on Operational and Financial Efficiency in Manufacturing Industry. *Journal of Economic Education and Entrepreneurship Studies*, *5*(3), 491-501. https://doi.org/10.62794/je3s.v5i3.4328

DRAFT VERZIJA

LOGISTIKA I LANCI SNABDEVANJA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

RASPOREĐIVANJE BRODOVA NA PRISTAJALIŠTA PRIMENOM PROŽDRLJIVIH HEURISTIČKIH ALGORITAMA

SOLVING THE BERTH ALLOCATION PROBLEM USING GREEDY HEURISTIC ALGORITHMS

MILICA BABIĆ[1], MILOŠ NIKOLIĆ[2], IVANA VUKIĆEVIĆ BIŠEVAC[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, babicmilica16@yahoo.com, 0009-0003-8182-7279
[2] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, m.nikolic@sf.bg.ac.rs 0000-0001-5892-8248
[3] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, i.vukicevic@sf.bg.ac.rs 0000-0003-2254-3885

Rezime: *Sa porastom prometa na kontejnerskim terminalima i sa konstantnim povećanjem nosivosti kontejnerskih brodova, dolazi do zagušenja u lukama prilikom pristajanja brodova. Problem raspoređivanja brodova na pristajališta, predstavljen u ovom radu, za cilj ima minimiziranje vremena koje brodovi provedu u luci. Smanjenjem tog vremena, smanjuju se i ukupni troškovi koje brod ima, što je veoma važno. Predstavljena su dva prožđrljiva heuristička algoritma za rešavanje dinamičkog problema raspoređivanja brodova na pristajališta. Kao rešenje problema se dobijaju se informacije koji brod bi trebalo rasporediti na koje pristajalište u kom trenutku. Sva testiranja vršena su na primerima iz literature. Dobijeni rezultati predloženim heurističkim algoritmima upoređeni su međusobno, kao i sa rezultatima iz literature. Na osnovu testiranja može se zaključiti da se predloženim algoritmima može doći do kvalitetnih rešenja za veoma kratko vreme rada računara.*

Ključne reči*: Problem dodeljivanja pristajališta, heuristički algoritmi.*

Abstract: *The increase in traffic at container terminals, as well as a constant rise in the capacity of container ships, leads to congestion in ports upon the arrival of ships. The Berth Allocation Problem, which is presented in this paper, aims to minimize the time ships spend in the port. In addition to reducing this time, there is also a reduction in the total cost for the ship, which is very important. Two greedy heuristic algorithms are presented to solve the dynamic Berth Allocation Problem. The results provide a solution showing the specific ship that should be assigned to the berth. The obtained results were compared with those previously reported in the literature. Furthermore, the performance of the two algorithms proposed in this paper was compared in order to show their effectiveness.*

Keywords: *Berth Allocation Problem, heuristic algorithms.*

1. UVOD

Prevoz robe pomorskim putem važan je za međunarodnu trgovinu. Prema podacima UNCTAD-a, međunarodni pomorski transport čini 80% ukupnog svetskog transporta. Vrednost kontejnerskog pomorskog transporta u 2024. godini iznosi približno 9,5 triliona američkih dolara (Statista, 2025). U porastu je broj kontejnerskih brodova kao i njihova nosivost. Tokom 2024. godine globalna flota kontejnerskih brodova dostigla je nosivost od oko 30 miliona TEU kontejnera. Brodske kompanije sa najvećom flotom su MSC i Maersk, a slede ih kompanije CMA CGM, Cosco i Hapag-Lloyd (Statista, 2025). Trenutno najveći kontejnerski brodovi imaju nosivost preko 24000 kontejnera. Ova velika plovila su znatno uticala na smanjenje cena transporta robe, ali takođe zahtevaju i velika infrastrukturna ulaganja. Moraju se ulagati sredstva u povećanje pretovarne propusne sposobnosti luka što podrazumeva nabavku većih i savremenijih pretovarnih uređaja, kao i povećanje akvatorija i operativne obale.

Prethodno navedeno uzrokuje i porast prometa u lukama. Kontejnerski terminali su posebno opremljeni za pretovar sa brodova u kamione i vozove ili druga vozila specijalizovana za prevoz kontejnera za dalje skladištenje u luci (Radmilović, 2002). Terminal može posedovati nekoliko pristajališta. Organizacija rada terminala može podrazumevati da svi brodari dele ista pristajališta ili neka brodarska kompanija može

DRAFT VERZIJA

zakupiti određeno pristajalište. Lučki operateri imaju za cilj da maksimalno iskoriste lučku infrastrukturu i suprastrukturu, dok je brodarima u interesu da što kraće čekaju na opslugu i da budu što brže opsluženi.

U ovom radu predstavljen je problem raspoređivanja brodova na pristajališta (eng. Berth Allocation Problem). U drugom poglavlju detaljno je opisana sama priroda problema, dok treće poglavlje donosi pregled literature koja se bavi ovim temom. Četvrto poglavlje posvećeno je predstavljanju dva heuristička proždrljiva algoritma. U petom poglavlju su prikazani rezultati testiranja razvijenih algoritama, kao i njihovo poređenje sa stvarnim podacima iz luke Đoja Tauro.

2. PROBLEM RASPOREĐIVANJA BRODOVA NA PRISTAJALIŠTA

Problem raspoređivanja brodova na pristajališta jedan je od glavnih operativnih problema u lukama jer ima za cilj raspoređivanje brodova na pristajališta tako da se ispune određeni kriterijumi. Raspoređivanje lučke suprastrukture zavisi od rešenja ovog problema. Ovo može da ima veliki značaj u lukama u kojima postoji više pristajališta za kontejnerske brodove. Dobro organizovano raspoređivanje brodova ima suštinski značaj za troškove i nivo usluge u luci. Cilj je formirati raspored brodova čije se pristajanje očekuje u narednom periodu tako da se minimizira ukupno vreme koje svi brodovi provedu u luci. Ovo vreme se računa od dolaska broda u luku do završetka procesa pretovara.

Postoji nekoliko podela ovog problema koje su naveli u svom radu Bierwirth i Meisel (2014). Prva podela se pravi prema ograničenjima koja se javljaju na terminalima, odnosno pristajalištima. Diskretni problem podrazumeva da postoji konačan broj pristajališta na koje brodovi mogu pristati i najviše jedno plovilo se može opsluživati na određenom pristajalištu u određeno vreme. Kontinualni problem podrazumeva da brodovi mogu pristajati dužinom cele operativne obale. Kod hibridnog problema operativna obala je podeljena na pristajališta, ali brodovi mogu da koriste istovremeno jedno pristajalište ili jedan brod može zauzeti više od jednog pristajališta ako je to potrebno. Poslednja kategorija ove podele je slučaj kada brod zbog svojih karakteristika ne može pristati na svako pristajalište, pa se mora napraviti plan pristajanja broda shodno karakteristikama broda i pristajališta. Druga važna podela je na statičke i dinamičke probleme raspoređivanja brodova na pristajališta. Statički problem raspoređivanja brodova na pristajališta podrazumeva da se u trenutku kada pristajališta počinju sa opsluživanjem svi brodovi već nalaze u luci. Dinamički problema raspoređivanja uzima realniju pretpostavku, a to je da neki brodovi mogu doći u luku i nakon što pristajališta počnu sa radom, odnosno tokom opsluge nekih brodova koji su ranije već stigli u luku.

Većina modela se bazira na minimiziranju vremena koje brodovi provedu u luci. To se postiže minimiziranjem vremena čekanja na pretovar, kao i smanjenjem vremena koje brod provede na pretovaru, što dovodi i do smanjenja broja brodova koji sa zakašnjenjem napuštaju pristajalište. Takođe može se uzeti u obzir i da neki brod stigne ranije nego što je bilo planirano. Pored minimiziranja vremena, postoje i modeli u kojima se nastoji da redukuju operativne troškove optimizacijom korišćenja resursa poput kranova, pretovarnih uređaja, vozila, ljudstva. Postoje i formulacije gde se u obzir uzima udaljenost pristalog broda od skladišta gde će se smeštati kontejneri pa se pokušava napraviti plan pristajanja brodova tako da im skladište bude što bliže. U ovom radu rešavan je diskretan dinamički problem raspoređivanja brodova na pristajališta, sa ciljem da se minimizira ukupno vreme koje brodovi provode u luci.

3. PREGLED LITERATURE

Sa proučavanjem problema se počelo ’90 ih godina 20. veka. Imai i drugi (1997) su formulisali diskretni statički problem tako da se minimizira ukupno vreme provedeno u luci. Imai i drugi (2001) formulisali su dinamički problem raspoređivanja brodova na pristajališta, slično su kasnije radili Monaco i Sammarra (2007). Zbog složenosti razmatranog problema autori su za rešavanje koristili Lagranževe relaksacije. Kontinualni problem pomoću Lagranževe relaksacije rešavali su Park i Kim (2002). Eksperiment je prikazao rezultate primenjivosti ove metode koja podrazumeva da postoji manje od 20 plovila. Kim i Moon (2003) su nastavili rešavanje ovog problema. Formulisali su model celobrojnog linearnog programiranja koji može da reši slučaj kada je u planiranje uključeno 7 brodova i 3 dana planiranja. Cordeau i drugi (2005) su rešavali dinamički, diskretni problem alokacije pristajališta. Imai i drugi (2005) su rešavali kontinualni problem raspoređivanja pomoću heuristike. Dai i drugi (2007) su problem raspoređivanja na pristajališta podelili na dva dela. Prvi problem je podrazumevao minimizaciju troškova koji se stvaraju zbog utrošenog vremena, dok je drugi problem podrazumevao minimizaciju troškova prostora. Imai i drugi (2008) proučavali su problem uključujući posebna ograničenja zbog ograničene proizvodnosti operativne obale, pa su plovila, za koja se prognoziralo dugo vreme čekanja na pretovar, izmeštana na neki drugi terminal. Lee i drugi (2010) su rešavali kontinualni dinamički problem alokacije vezova pomoću “Greedy Randomized Adaptive Search Procedure”. Nikolić i Teodorović (2017) predložili su nove matematičke formulacije za dinamički diskretni

problem dodeljivanja pristajališta brodovima. Poslednjih godina formulisanju i rešavanju problema raspoređivanja brodova na pristajališta posvećena je takođe značajna pažnja. Razvijene su razni modeli linearnog (Chang i Tsai, 2024) i fazi linearnog programiranja (Pérez-Cañedo i drugi, 2020) (Oudani i Benghalia, 2022).

4. PROŽDRLJIVI HEURISTIČKI ALGORITMI

Proždrljivi heuristički algoritmi služe za rešavanje problema kombinatrone optimizacije. Ovi algoritmi uglavnom daju dobra, ali ne i optimalna, rešanja problema koji se razmatra. Njihovo korišćenje ima smisla ako bi rešavanje problema egzaktnim algoritmima (koji daju uvek optimalna rešenja) trajalo neprihvatnjivo dugo. Proždrljivi heuristički algoritmi se izvršavaju u iteracijama, gde se u svakoj iteraciji nadograđuje jedan deo rešenja problema. Nadogradnja problema se vrši tako što se bira deo rešenja kojim će se postići najbolji uticaj na kriterijumsku funkciju (najviše će se uvećati u slučaju da se želi njena maksimizacija, ili najmanje će se uvećati ako se želi njena minimizacija). Izvršavanje iteracija se zaustavlja kada se formira kompletno rešenje.

U ovom radu predložena su dva proždrljiva heuristička algoritma kojima se teži dolasku do najmanjeg ukupnog vremena koje brodovi provedu u luci. Terminal je podeljen na tačno određen broj pristajališta. Jedan brod se može dodeliti jednom pristajalištu. Dinamika se ogleda u vremenima dolaska brodova, koja se razlikuju, a cilj je ukupno vreme provedeno u luci bude minimlano. U nastavku teksta na Slikama 1. i 2. prikazani su pseudo kodovi za oba algoritma.

```
Ulaz:
  B:= skup pristajališta; V:= skup brodova

Inicijalizacija:
  Za svako pristajalište i∈B postavi vreme kada postaje slobodno: slobodno_vreme[i]:= 0
  Za svaki brod j∈V postavi status: opslužen[j]:= false

Algoritam:
1. Dok postoji brod j∈V takav da opslužen[j] = false, ponavljaj:

    a. Odaberi brod j koji je prvi došao u luku i još nije opslužen

    b. Za svaki i∈B izračunaj:
         - vreme početka opsluge: početak:= max(vreme_dolaska[j], slobodno_vreme[i])
         - vreme završetka opsluge: završetak:= početak + trajanje_opsluge[j]

    c. Odaberi pristajalište i za koje je završetak minimalan

    d. Dodeli brod j pristajalištu i:
         - slobodno_vreme[i]:= završetak
         - opslužen[j]:= true

2. Izračunaj ukupno vreme koje su svi brodovi proveli u luci:
     ukupno_vreme:= Σ (vreme_završetka[j]- vreme_dolaska[j]) za sve j∈V

Izlaz:
  ukupno_vreme
```

Slika 1: Pseudo kod za prvi proždrljivi algoritam

```
Ulaz:
  B:= skup pristajališta; V:= skup brodova

Inicijalizacija:
  Za svako pristajalište i∈B postavi vreme kada postaje slobodno: slobodno_vreme[i]:= 0
  Za svaki brod j∈V postavi status: opslužen[j]:= false

Algoritam:
1. Dok postoji brod j∈V takav da opslužen[j] = false, ponavljaj:

    a. Za svaki brod j∈V koji još nije opslužen i za svako pristajalište i∈B izračunaj:
         - početak:= max(vreme_dolaska[j], slobodno_vreme[i])
         - završetak:= početak + trajanje_opsluge[j]

    b. Odaberi par (j, i) za koji je završetak minimalan

    c. Dodeli brod j pristajalištu i:
         - slobodno_vreme[i]:= završetak
         - opslužen[j]:= true

2. Izračunaj ukupno vreme koje su svi brodovi proveli u luci:
     ukupno_vreme:= Σ (vreme_završetka[j] - vreme_dolaska[j]) za sve j∈V

Izlaz:
  ukupno_vreme
```

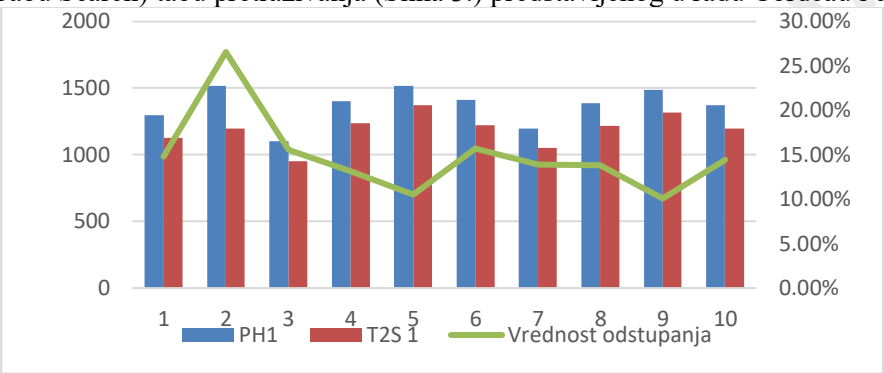
Slika 2: Pseudo kod za drugi proždrljivi algoritam

5. REZULTATI TESTIRANJA PREDLOŽENIH ALGORITAMA

U ovom poglavlju su predstavljeni rezultati testiranja predloženih algoritama. Testiranja su izvršena na dva skupa primera I2 i I3. Skup I2 sadrži 10 primera označenih kao "nxm-c" gde je *n* broj brodova, *m* je broj pristajališta, a *c* je redni broj primera (*c* = 1,...10). Skup I3 sadrži 30 primera označenih kao "ic", gde je *c* = 1,...30. Broj brodova *n* = 60, dok je broj pristajališta *m* = 13. Podaci navedeni u ovim primerima su realni podaci iz luke Đoja Tauro i korišćeni su već u literaturi. Predloženi algoritmi su razvijeni u Net Beans 8.2. IDE editoru programskog jezika Java. Sva testiranja su izvršena na računaru sledećih karakteristika Intel(R) Core(TM) i5-3470, CPU 3.2. GHz, 8GB RAM memory. Vremena rada računara za oba algoritma pri rešavanju svih primera bila su zanemarljivo mala (manja od jedne sekunde). U narednim poglavljima prikazani su delimični rezultati za najsloženije primere iz obe grupe.

5.1. Upoređivanje rezultata prvog heurističkog algoritma i tabu pretraživanja

U prvom slučaju upoređeni su rezultati prvog predloženog heurističkog algoritma u ovom radu i T2S (eng. Time based Tabu Search) tabu pretraživanja (Slika 3.) predstavljenog u radu Cordeau i drugi (2005).

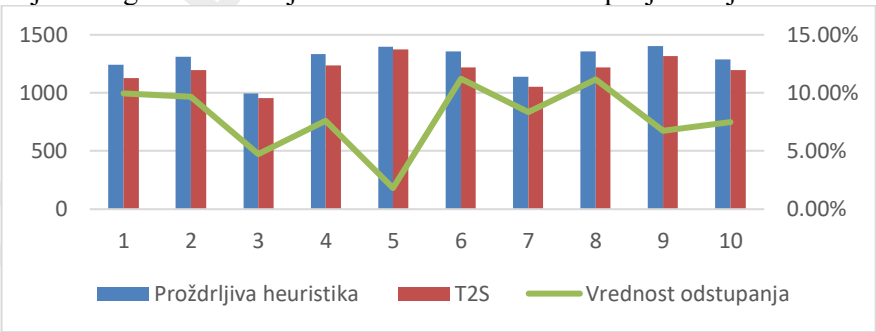


Slika 3: Uporedni prikaz vrednosti Proždrljivog algoritma i Tabu pretraživanja

Upoređivanjem dobijenih rezultata dolazi se do zaključka da su rezultati dobijeni ovim proždrljivim algoritmom lošiji. Prosečna vrednost odstupanja dobijenih rezultata je 13,76%.

5.2. Upoređivanje rezultata drugog heurističkog algoritma i tabu pretraživanja

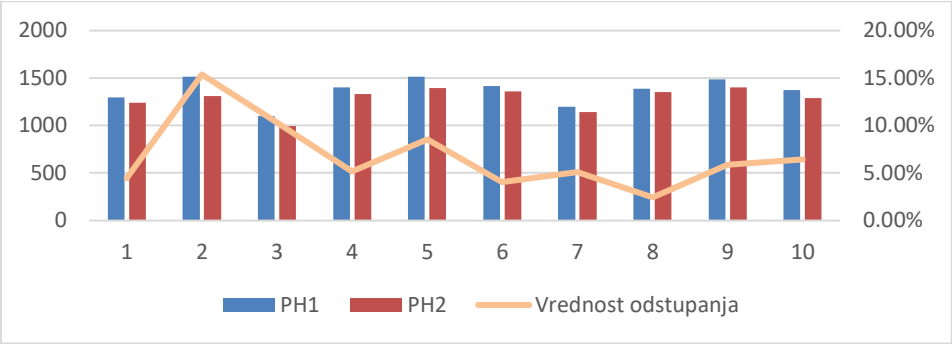
Sledeće je predstavljena analiza rezultata dobijenih korišćenjem drugog proždrljivog algoritma i T2S (eng. Time based Tabu Search) tabu pretraživanja predstavljenog u radu Cordeau i drugi (2005). Rešenja su data za set primera I2 (Slika 4.). Upoređivanjem dobijenih rezultata dolazi se do zaključka da su rezultati dobijeni ovim proždrljivim algoritmom lošiji. Prosečna vrednost odstupanja dobijenih rezultata je 9,77%.



Slika 4: Uporedni prikaz vrednosti proždrljivog algoritma i tabu pretraživanja

5.3. Upoređivanje rezultata dva proždrljiva algoritma za skup primera I2

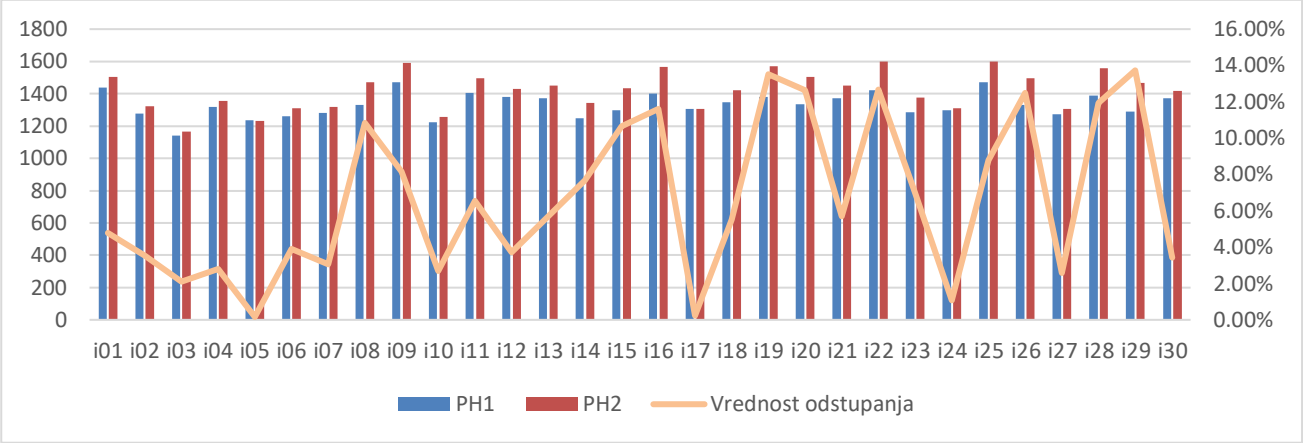
U ovom odeljku upoređeni su rezultati proždrljivih algoritama (Slika 5.), predstavljenih u radu, za set primera I2. Za ovaj set primera može se zaključiti da su u većini slučajeva bolji rezultati dobijeni korišćenjem drugog proždrljivog algoritma. Prosečna vrednost za koliko se razlikuju dobijeni rezultati u ovom slučaju je 3,77%.



Slika 5: Uporedni prikaz vrednosti dve proždrljive heuristike i predstavljene u ovom radu za skup primera I2

5.4. Upoređivanje rezultata dva proždrljiva algoritma za skup primera I3

U poslednjem slučaju upoređeni su rezultati dobijeni rešavanjem proždrljivih heurističkih algoritama predstavljenih u ovom radu (Slika 6.) za skup primera I3. Može se zaključiti da se u slučaju ovog skupa primera bolja rešenja dobijaju korišćenjem prvog proždrljivog algoritma. Prosečna vrednost odstupanja među dobijenim rezultatima iznosi 6,63%.



Slika 6: Uporedni prikaz vrednosti dve proždrljive heuristike i predstavljene u ovom radu za skup primera I3

6. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen problem raspoređivanja brodova na pristajališta. Dat je osvrt na ranije radove koji proučavaju ovaj problem, opisan je problem, zatim su predstavljena dva proždrljiva heuristička algoritma za rešavanje problema raspoređivanja brodova na pristajališta i na kraju su analizirani dobijeni rezultati.

Upoređivanje rezultata Tabu pretraživanja i predloženog heurističkog algoritma pokazalo je da metoda tabu pretraživanja daje bolje rezultate. Međutim prosečna vrednost odstupanja između dobijenih rezultata pokazuje da su odstupanja manja korišćenjem drugog predloženog algoritma. Daljim unapređivanjem heurističkog algoritma, u budućnosti bi se moglo doći do mnogo boljih rezultata.

Upoređivanje proždrljivih heurističkih algoritama predstavljenih u ovom radu pokazalo je da u slučaju skupa primera I3 bolje rezultate daje prvi algoritam, dok su za skup primera I2 dobijeni bolji rezultati korišćenjem drugog algoritma.

LITERATURA

Bierwirth, C., Meisel F. (2014). A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, European Journal of Operational Research, str. 675 – 689.

Chang, S.-C., & Tsai, J.-F. (2024). An Optimization Approach to Berth Allocation Problems. Mathematics. https://doi.org/10.3390/math12050753

Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., Moccia, L. (2005). Models and Tabu Search Heuristics for the Berth Allocation Problem, transportation science 39 (4), 526-538.

Dai, J., Lin, W., Moorthy, R., Teo C. (2007). Berth allocation planning optimization in container terminal, Supply Chain Analysis: A Handbook on the Interaction of Information, System and Optimization, 69.

Imai, A., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2001). The dynamic berth allocation problem for a container port, Transportation Research 35B, str. 401–417.

Imai, A., Sun, X., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2005). Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach, Transportation Research Part B 39 (3), 199-221.

Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2008). Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity, Transportation Research Part E 44(1), 136-151.

Lee, D., Chen, J. H., Cao, J. X. (2010). The continuous Berth Allocation Problem: A Greedy Randomized Adaptive Search Solution, Transportation Research Part E 46, 1017-1029.

Kim, K., Moon, K. (2003). Berth scheduling by simulated annealing, Transportation Research Part B 37 (6), 541-560.

Monaco, M., Sammarra, M. (2007). The berth allocation problem: a strong formulation solved by a Lagrange approach, Transportation science 41 (2), 265.

Nikolić M., Teodorović, D. (2017). New mathematical formulations of the dynamic berth allocation problem, 3rd Logistics International Conference, Belgrade, Serbia, str. 2-7.

Oudani, M., & Benghalia, A. (2022). Berth Allocation Problem with uncertain arrival and handling times. International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications, 31–35. https://doi.org/10.1109/SETIT54465.2022.9875848

Park, K., Kim, K. (2002). Berth scheduling for container terminals by using sub-gradient optimization technique, Journal of the Operational Research Society 53 (9), 1054-1062.

Pérez-Cañedo, B., Verdegay, J. L., Rosete, A., & Concepción-Morales, E. R. (2020). Fully Fuzzy Multi-objective Berth Allocation Problem (pp. 261–272). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61705-9_22

Radmilović , Z. (2002). Planiranje i razvoj luka i pristaništa (drugo izdanje), Beograd, Republika Srbija, Saobraćajni fakultet.

Statista, Statistics and Facts about Container Shipping (2025)

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

ФОН
UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

ПРИМЕНА ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА И ПРИСТУПА КЛИЗАЈУЋЕГ ХОРИЗОНТА ПЛАНИРАЊА ЗА РЕШАВАЊЕ ПРОБЛЕМА ЗАЈЕДНИЧКОГ ПОРУЧИВАЊА У ВИШЕКАНАЛНОЈ ПРОДАЈИ

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS AND ROLLING HORIZON PLANNING APPROACH FOR SOLVING THE JOINT ORDERING PROBLEM IN MULTI-CHANNEL RETAIL

МИЛИЦА РАДЕВИЋ[1], ДРАЖЕН ПОПОВИЋ[2], ГОРДАНА РАДИВОЈЕВИЋ[3]

[1] Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Београд, milica.radevic@sf.bg.ac.rs, 0000-0002-6658-4040
[2] Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Београд, d.popovic@sf.bg.ac.rs, 0000-0002-8027-5017
[3] Универзитет у Београду, Саобраћајни факултет, Београд, g.radivojevic@sf.bg.ac.rs, 0000-0001-5815-7914

Резиме: *У овом раду је представљен модел генетских алгоритама (ГА) са применом приступа клизајућег хоризонта планирања за решавање проблема заједничког поручивања у оквиру вишеканалне продаје једног трговинског ланца. Овај приступ омогућава динамично доношење одлука у оквиру вишедневног планског периода кроз низ клизајућих периода (енгл. rolling horizon). У овом раду су тестирани различити утицаји параметара ГА – селекције, укрштања, мутације, величине популације и трајање извршавање рада модела. Резултати показују да дужа временска ограничења рада модела доводе до стабилније претраге и бољих решења. Најбољи резултати су постигнути при умереном нивоу укрштања (40%), већем учешћу мутације (20%), примени рулет селекције (20%), као и употреби елитизма у распону од 10-20%. Иако мања популација омогућава више генерација у датом времену, бољи резултати функције циља остварени су са већом популацијом, што указује на значај шире и дубље претраге решења унутар простора претраге.*

Кључне речи: *проблем заједничког поручивања, генетски алгоритми, rolling horizon приступ, вишеканална продаја.*

Abstract: *This paper presents a genetic algorithm (GA) model using a rolling horizon planning approach to solve the problem of joint ordering within the multi-channel sales of a retail chain. This approach enables dynamic decision-making within a multi-day planning period through a series of rolling horizons. In this paper, different influences of GA parameters – selection, crossover, mutation, population size and model execution duration – were tested. The results show that longer time constraints on the model operation lead to more stable searches and better solutions. The best results were achieved with a moderate level of crossover (40%), a higher mutation rate (20%), the application of selection roulette (20%), and the use of elitism in the range of 10-20%. Although a smaller population allows for more generations in a given time, better objective function results are achieved with a larger population, which indicates the importance of stacking and deeper search for solutions within the search space.*

Keywords*: joint replenishment problem, genetic algorithms, rolling horizon approach, multichannel sales.*

1. УВОД

Савремени услови пословања на које утиче потрошачко понашање као и пораст очекивања купаца, подстиче трговачке компаније на прилагођавање новим захтевима и променама пословних стратегија у непрекидној трци са конкуренцијом. Управо, једна од нових пословних стратегија је интеграција вишеканалне продаје. Вишеканална продаја омогућава обједињено управљање залихама чиме се може побољшати способност компаније да одговори на потражњу кроз различите продајне канале. Главни логистички изазов у овом контексту јесте ефикасна интеграција онлајн и офлајн канала уз истовремено управљање ограниченим ресурсима и залихама у реалном времену (Boctor et al., 2004). Једна од кључних стратегија за оптимизацију ланаца снабдевања у вишеканалној продаји јесте проблем заједничког поручивања JRP-a (енгл. Joint Replenishment Problem). Ова стратегија омогућава

DRAFT VERZIJA

заједничко поручивање робе за више артикала у циљу смањења укупних логистичких трошкова, укључујући трошкове поручивања, транспорта, складиштења као и недостатка залиха. У већини истраживачких радова на тему JRP-а, аутори су се бавили одређивањем оптималног плана поручивања робе у једном фиксном временском периоду (Noh, 2023). Међутим, логистичке задатке попут планирања и организације процеса често је потребно оптимизовати у више временских периода. Према томе, како би се превазишло то ограничење предлаже се примена приступа клизајућег хоризонта планирања RH (енгл. Rolling horizon) који омогућава ажурирање плана поручивања у складу са променама у временском периоду.

У литератури постоји велики број радова који се баве JRP проблематиком у оквиру вишеканалне продаје и у наставку је издвојено неколико радова. Jiu (2022) је развио стохастички модел за оптимизацију JRP-а у вишеканалној продаји, у којем се на почетку сваког периода доноси одлука о поруџбинама по артиклу и каналу, након чега следи одлука о алокацији количина из дистрибутивног центра. У оквиру истог проблема, али уз другачији методолошки приступ Lorenzo-Espejo et al., (2024) предлажу хибридни метахеуристички модел за решавање JRP-а, где је комбинацијом алгоритма оптимизације групе честица и симулираног каљења решаван проблем за малопродајни систем у текстилној индустрији. Nedaei & Mahlooji (2014) дају допринос у решавању JRP-а користећи две хеуристике у комбинацији са RH приступом узимајући у обзир стохастичку потражњу, неостварену продају и време испоруке. Lian et al. (2010) су развили JRP модел са RH приступом, који омогућава купцима да ажурирају информације о потражњи и статусу залиха, модификују већ поручене количине робе и захтевају нове поруџбине за наредни RH период. Boujnah et al. (2024) су представили модификован алгоритам оптимизацијеројем честица са RH приступом за збирно планирање производње у фармацеутској индустрији. Аутори ефикасно распоређују ресурсе кроз временске хоризонте, узимајући у обзир динамичност производње и ограничене капацитете, чиме се индиректно решава и проблем JRP. Elyasi et al. (2024) предлажу метахеуристички приступ за решавање JRP-а у сценаријима са и без ресурсних ограничења. Комбиновањем математичког програмирања и хеуристичких модела, аутори успешно решавају проблеме великих димензија, демонстрирајући применљивост приступа у сложеним логистичким системима са више нивоа одлучивања и реалним условима ланаца снабдевања. Suemitsu et al. (2024) су се бавили JRP проблематиком кроз интеграцију планирања продаје, залиха и транспортних ресурса уз динамичку потражњу и временски променљиве трошкове. Аутори су развили капацитивни JRP модел који омогућава обједињено одлучивање у сложеним условима. Предложен је тростепени приступ који комбинује оптимизацију и симулацију, а резултати показују знатно брже решавање проблема у поређењу са традиционалним методама.

Циљ овог рада је развој метахеуристичког модела са применом RH приступа за решавање JRP-а у систему вишеканалне продаје трговинског ланца са циљем минимизације укупних трошкова. Укупни трошкови се састоје од трошкова поручивања, складиштења, додатног складиштења и залиха у контексту поседовања или недостатка залиха у односу на планске нивое. Рад је организован у пет поглавља. У другом поглављу је описан посматрани проблем. У трећем поглављу је приказан дијаграм тока ГА модела са RH приступом за решавање JRP-а. Четврто поглавље представља опис тестних инстанци и резултата примењеног модела. У петом поглављу су представљена закључна разматрања.

2. ОПИС ПРОБЛЕМА

У овом раду разматра се проблем заједничког поручивања робе у контексту вишеканалног малопродајног система једне трговинске компаније која поручује више артикала од једног снабдевача. Компанија реализује продају путем два дистрибутивна канала: традиционалног, односно физичких продавница (офлајн канал) и е-трговине, односно интернет продавнице (онлајн канал). Поруџбине се формирају на дневном нивоу, при чему је укупна количина поручене робе ограничена капацитетом транспорта и мора одговарати капацитету једног или више потпуно попуњених возила. Поруџбине по артиклу се могу вршити искључиво у целим палетама, при чему је минимална јединица поруџбине једна палета. У оба канала, продаја се реализује на нивоу појединачних јединица артикала (комада). Цене артикала за е-трговину је нешто повољнија у односу на цене у физичким продавницама, чиме се подстиче дигитална продаја. Складишни капацитет компаније је ограничен, и у случају потребе додатног складиштења примењују се повећани трошкови складиштења. Трошкови складиштења се обрачунавају по основу заузетог палетног места. Транспорт робе од снабдевача до складишта компаније се обавља хомогеним возним парком.

Циљ модела је одређивање плана поручивања током дефинисаног планског периода који минимизује укупне трошкове, укључујући трошкове поручивања, транспорта, складиштења, додатног складиштења, као и поседовања или недостатка залиха у односу на планске нивое. Додатно, у циљу

повећања отпорности плана на промене и његове прилагодљивости реалним условима, модел користи RH приступ. У моделу се узима у обзир и време испоруке *LT* (енгл. Lead time) које представља број дана од момента поручивања до пријема робе. На пример, ако је *LT*=1, поручена роба стиже наредног дана и није доступна првог дана планирања. За сваки дан у планском периоду познате су прогнозиране количине потражње по артиклима и каналима. Поред тога, за сваки артикал дефинисан је минимални ниво безбедносних залиха, ради избегавања ризика од недостатка залиха и губитка продаје.

3. ПРИСТУП КЛИЗАЈУЋИХ ПЕРИОДА И МОДЕЛ ГЕНЕТСКИХ АЛГОРИТАМА

Традиционални модели JRP-а често су засновани на детерминистичкој потражњи, што отежава планирање у реалним условима које је окарактерисано неизвесношћу. Сходно томе, примена RH приступа омогућава постепено, итеративно ажурирање плана поручивања на основу нових информација о потражњи, чиме се повећава ефикасност система (Suemitsu et al., 2023). RH приступом се након сваког периода, део претходно оптимизованог плана прихвата, а нови план се формира на основу ажурираних података. На овај начин се обезбеђује динамичко управљање залихама у условима променљиве потражње (Boujnah et al., 2024).

Са друге стране, ГА као једна од најефикаснијих и често коришћених метахеуристичких метода, показала се веома погодном за решавање комбинаторних и комплексних оптимизационих проблема као што је JRP (Noh, 2023, Wildeman et al.,1997). Примена ГА омогућава претраживање великог простора решења коришћењем операција селекције, укрштања и мутације за проналажење квалитетних решења при вишеструким ограничењима у прихватљивом временском оквиру. Ограничења могу бити капацитет складишта, искоришћеност возила, минималне количине поручивања итд.

Комбинацијом RH приступа и ГА развија се модел који користи предности оба приступа: адаптивност RH приступа у временском периоду и оптимизациону могућност ГА у проналажењу квалитетних решења у сваком периоду. Овакав приступ омогућава ефикасно решавање JRP у реалним условима вишеканалне продаје са циљем минимизације укупних трошкова ланца снабдевања. ГА који се примењује у овом моделу заснован је на већ развијеном моделу из рада (Popović et al., 2024), где је детаљно описана структура јединке, процес иницијализације популације, операције селекције, укрштања и мутације, као и услови заустављања алгоритма. У овом раду, модел је додатно унапређен применом RH приступа, при чему се оптимизација спроводи итеративно, односно клизајући по планским периодима. Кључне новине у односу на претходно развијен модел су:

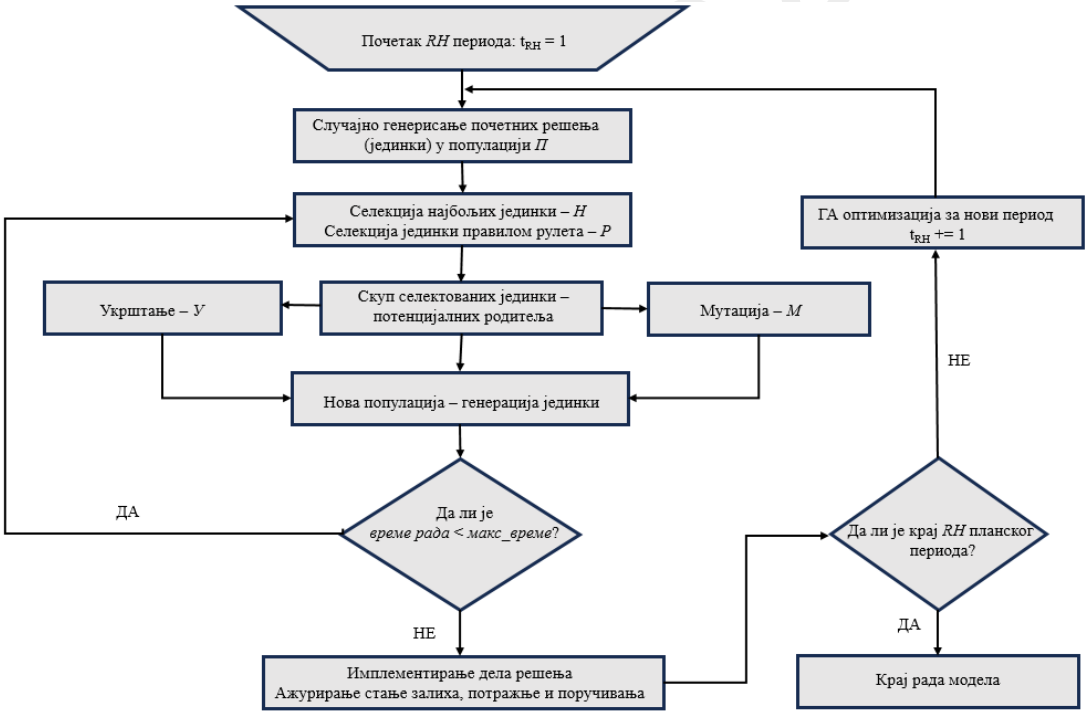
- Клизајући хоризонт планирања: RH приступ подразумева да се оптимизација покреће на почетку сваког хоризонта планирања (t_{RH}), а резултати оптимизације се имплементирају делимично (само за први дан текућег хоризонта). Након тога, хоризонт се помера за један дан унапред (t_{RH} += 1) и процес се понавља.
- Ажурирање улазних параметара након сваког хоризонта: ажурирају се параметри стања залиха, потражње и поручивања, чиме се осигурава да свака нова оптимизација буде заснована на реалним и ажурираним подацима.
- Континуирано извршавање модела до краја планираног периода: модел наставља са радом све док се не достигне крај укупног хоризонта планирања.

4. ТЕСТНЕ ИНСТАНЦЕ И РЕЗУЛТАТИ

У циљу верификације и евалуације предложеног ГА модела за решавање JRP-а, креиран је скуп података који обухвата 10 различитих инстанци које су случајно генерисане. За све инстанце дефинисани су следећи заједнички параметри: број артикала И = 20, дужина планског периода Т = 5, број клизајућих планских периода RH = 5, време испоруке LT = 1, број канала продаје К = 2, капацитет складишта од 70 палета и капацитет возила од 14 палета по испоруци. Планирани минимум залиха по артиклу постављен је ниво 1.5 просечне дневне потражње. Подаци за сваку инстанцу појединачно су генерисани на случајан начин и укључују: иницијално стање залиха, број јединица (комада) по палети за сваки артикал, прогнозиране вредности дневне потражње за сваки плански период и јединичне цене по каналима продаје. На овај начин обезбеђена је хетерогеност инстанци и реални сценарији који омогућавају свеобухватну анализу понашања модела у различитим условима. Финансијски део модела обухвата више врста трошкова, укључујући: фиксни трошак транспорта (100€ по допреми), трошак поручивања (1€ по артиклу), трошак редовног складиштења (0.20€ по палети дневно), трошак чувања ван планског складишног капацитета (0.40€ по палети дневно), трошак везаног капитала (2% дневно од вредности залиха према цени артикала у физичким продавницама), као и трошак недостатка робе (који се моделира као трострука цена артикала у физичким продавницама). На Слици 1 је приказан

DRAFT VERSION

дијаграм тока модела са RH приступом за решавање JRP заснованог на моделу из рада (Popović et al., 2024). Циљ модела је да се за сваки плански период оптимизује план поручивања, уз ажурирање релевантних параметара као што су стање залиха, потражња и поручивање који се мењају током времена. Модел се заснива на RH приступу, при чему се на почетку сваког периода примењују процес оптимизације кроз ГА. Процес почиње иницијализацијом првог RH периода, након чега се на случајан начин генерише почетна популација потенцијалних решења (јединки). Свако јединка у популацији представља план поручивања за један плански период. Након тога следи процес селекције који комбинује елитизам (директан пренос најбољих јединки у следећу генерацију) и рулет селекцију (која бира на случајан начин преостале родитеље на основу вредности функције циља). Затим изабране јединке учествују у процесу укрштања, током којег се генеришу нове јединке комбиновањем родитеља. Поред укрштања, на нову популацију се примењује и операција мутације, која служи да уведе додатну разноликост у популацију кроз случајне измене појединих делова јединке. Након формирања нове генерације за све јединке се израчунава функција циља. Цео процес (селекција, укрштање, мутација и евалуација) се понавља итеративно све док време рада ГА модела у текућем планском периоду не достигне унапред дефинисано ограничење (макс_време). По истеку временског ограничења, као решење се имплементира најбоља јединка из последње генерације. На основу тог решења ажурирају се параметри стања залиха, потражње и поручивања, након чега модел прелази на следећи (tRH += 1) период. Уколико крајњи хоризонт није достигнут процес се наставља, у супротном модел завршава свој рад.



Слика 1: Дијаграм тока ГА модела са RH приступом за решавање посматраног JRP-а

У оквиру експерименталне анализе, посебна пажња посвећена је подешавању и оптимизацији параметара ГА модела. Истраживани су ефекти различитих величина почетне популације, као и појединачних генетских операција у процесу еволуције у четири различита временска ограничења за извршавање ГА модела са RH приступом. Параметар *RH_време* представља време рада ГА модела за целокупан RH период, док је максимално време рада ГА модела (*макс_време*) за један плански период 2, 4, 6 и 10 секунди. На пример, ако је *макс_време* за један плански период 2 секунде, онда се решење једне инстанце са пет планских периода добија након *RH_време* = 10 секунди. Такође, анализирано је учешће елитне селекције (*H*), селекције засноване на рулет методи (*P*), укрштања (*У*) и мутације (*М*) у формирању нових генерација. ГА модел са RH приступом је креиран у Python 3.10 програмском језику, а инстанце су решаване на рачунару *AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor 3.60 GHz*.

У Табели 1 су приказане просечне вредности функције циља (*Ф*) и просечан број генерација (*Г*) у односу на време рада ГА модела, за 10 различитих инстанци које су решаване RH приступом са истом варијантом параметара модела. Свака инстанца је решавана у 20 итерација, уз промену параметара који се односе на основне операције ГА модела. Резултати показују да се вредности функције циља

побољшавају дужим временом рада модела тј. доприноси се побољшању квалитета решења. Анализом утицаја ГА оператора уочава се да су најбољи резултати модела када је мутација (*М*) присутна у већој мери. За сва четири тестирана времена, са параметром мутације *М* = 20% се постизала нижа просечна функција циља у односу на оне са *М* = 10%. Ово указује да повећани ниво варијације, који мутација уноси у популацију, има позитиван ефекат на избегавање локалних оптимума и подстицање дубље претраге. Посебно се та разлика истиче у краћим временским оквирима (*RH_време* = 10с) где је висок ниво мутације омогућио надокнаду ограниченог броја генерација кроз већу разноликост решења. Селекција је реализована комбиновањем елитизма и рулет методе. Виши ниво елитизма (*Н*=20%) се показао корисним у кратком времену решавања, где доприноси очувању добрих решења. Са друге стране, у дужим временима решавања, нижи проценат елитизма (*Н*=10%) у комбинацији са већом мутацијом резултирао је квалитетнија решења. Тестирани параметри укрштања показују да се најнижа вредност функције циља постиже у случају када је (*У*=40%). Умерено укрштање омогућава очување стабилних делова јединке, док мутација обезбеђује довољно диверзификације.

Анализа коефицијента варијације, који представља однос стандардне девијације и просечне вредности функције циља, указује на смањење варијабилности добијених решења са продужавањем времена рада ГА модела са RH приступом. Просечне вредности коефицијента варијације износиле су око 6,64% за време рада од 10с, 6,05% за 20с, 6,25% за 30с и 5,76% за 50с. Иако је код времена од 30с забележен блажи пораст у односу на 20с, резултат за 50с рада модела показује најнижи ниво варијације, што потврђује општи тренд побољшања стабилности модела са дужим временом рада. Поред смањења просечне варијације, уочен је и пад стандардне девијације, што додатно потврђује стабилност решења при дужем раду модела. Ови резултати потврђују да дуже време рада модела доприноси не само бољем просеку функције циља, већ и стабилнијим и поузданијим резултатима. Што се тиче величине популације, модели са (*П*=50) у просеку генеришу знатно више генерација у истом временом оквиру у односу на (*П*=100). Ипак, бољи резултати функције циља постигнути су управо са већом популацијом, што указује да квалитет претраге на зависи искључиво од броја генерација, већ и од ширине простора који се истовремено претражује. На пример, при *RH_време*=30с са параметром величине популације *П*=100 у просеку се остварује функција циља од 720€ са око 150 генерација, док *П*=50 и већи број генерација (300-400) у истом времену не постиже бољи резултат.

Табела 1: Просечне вредности функције циља и броја генерација по времену рада модела за 10 инстанци и различите варијанте параметра модела

П	*М*	*Р*	*У*	*Н*	*RH_време* = 10с		*RH_време* = 20с		*RH_време* = 30с		*RH_време* = 50с	
					Ф [€]	*Г*	*Ф* [€]	*Г*	*Ф* [€]	*Г*	*Ф* [€]	*Г*
50	10%	10%	60%	20%	752.1	117.7	735.2	234.6	730.9	355.6	725.9	577.7
			70%	10%	763.7	104.7	749.0	210.2	737.0	319.2	728.8	520.8
		20%	50%	20%	750.3	134.5	742.0	265.6	724.1	408.0	718.9	658.3
			60%	10%	762.6	119.4	737.2	238.1	737.5	362.9	725.6	588.7
	20%	10%	50%	20%	746.2	119.9	733.7	238.7	724.5	362.6	722.1	593.1
			60%	10%	754.2	105.1	735.5	213.8	724.2	327.8	724.6	534.1
		20%	40%	20%	747.5	137.5	733.4	273.8	726.4	416.8	714.5	694.6
			50%	10%	741.8	120.9	737.8	241.3	732.8	367.7	719.2	610.6
100	10%	10%	60%	20%	747.4	49.6	729.8	98.8	728.4	146.3	718.9	250.5
			70%	10%	763.9	45.5	741.2	90.1	731.4	132.5	720.8	228.4
		20%	50%	20%	752.8	57.1	735.6	113.0	728.2	169.5	718.6	285.6
			60%	10%	764.8	50.0	743.0	99.3	736.0	150.2	721.3	255.0
	20%	10%	50%	20%	744.2	51.9	730.7	103.3	720.1	154.8	713.7	260.5
			60%	10%	754.3	46.6	736.4	92.4	729.0	139.2	714.5	236.6
		20%	40%	20%	740.6	60.7	725.9	120.9	719.6	179.7	715.8	297.6
			50%	10%	758.5	52.4	738.8	104.8	723.7	158.6	718.0	263.0

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду модификован је постојећи модел ГА (Popović, et al., 2024), тако што је интегрисан RH приступ ради ефикаснијег решавања JRP-а у условима временски промењиве потражње и вишеканалне продаје. RH приступ омогућио је поступно ажурирање плана поручивања у условима временски промењиве потражње, док је ГА коришћен за оптимизацију плана поручивања у сваком планском периоду. Резултати показују стабилну конвергенцију ка квалитетним решењима у прихватљивом временском оквиру. Посебно је уочено да структура генетских оператора има значајан утицај на квалитет решења. Умерено укрштање и већи удео мутације показали су најбоље резултате у

различитим временским ограничењима, при чему је веће време извршавања модела довело до боље стабилности и нижих вредности функције циља. Коефицијент варијације потврђује да дуже време рада модела и већа популација не само да побољшавају просечне резултате, већ и смањују варијабилност решења. Ипак, потребно је истаћи да модел захтева додатни развој у сегменту оператора укрштања и мутације, ради постизања веће стабилности коефицијента варијације. Такође, један од могућих узрока флуктуације коефицијента варијације са порастом времена (нпр. за случај времена рада модела од *RH_време*=30с) може бити и релативно мали број итерација решавања инстанце, што можда није довољно за поузданију статистичку анализу. У том смислу, у наредним фазама истраживања биће спроведена и детаљнија анализа утицаја броја итерација на стабилност и конзистентност резултата модела. Поред тога, будуће истраживање биће усмерено на проширење модела у правцу решавања сложених сценарија, који обухватају већи број артикала, дужи планski период и разноврсније услове потражње. Посебан фокус биће на развоју адаптивних и само-подешавајућих параметара оператора ГА, који би омогућили динамичко прилагођавање параметара укрштања, мутације и селекције у зависности од фазе еволуционог процеса. На тај, начин модел би постигао боље балансирање између коришћења добрих решења и испитивања нових, потенцијално бољих решења, што би додатно допринело стабилности и ефикасности решења у различитим условима и временским ограничењима.

ЛИТЕРАТУРА

Boctor, F. F., Laporte, G., & Renaud, J. (2004). Models and algorithms for the dynamic-demand joint replenishment problem. *International Journal of Production Research*, 42(13), 2667–2678. https://doi.org/10.1080/00207540410001671660

Boujnah, I., Tlili, M., & Korbaa, O. (2024). A modified particle swarm optimization algorithm in a rolling horizon framework for the aggregate production planning problem: Pharmaceutical industry case. *Annals of Operations Research*. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05787-4

Elyasi, M., Ekici, A., Altan, B. Özener, Ö.O. (2024). A matheuristic for the joint replenishment problem with and without resource constraints. *Annals of Operations Research*. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06230-y

Jiu, S. (2022). Robust omnichannel retail operations with the implementation of ship-from-store. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 157, 102550. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102550

Lian, Z., Liu, L., & Zhu, S. X. (2010). Rolling-horizon replenishment: Policies and performance analysis. *Naval Research Logistics, 57*(6), 489–502. https://doi.org/10.1002/nav.20416

Lorenzo-Espejo, A., Muñuzuri, J., Guadix, J., & Escudero-Santana, A. (2022). A hybrid metaheuristic for the omnichannel multiproduct inventory replenishment problem. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 17(2), 476–492. https://doi.org/10.3390/jtaer17020025

Nedaei, H., & Mahlooji, H. (2014). Joint multi-objective master production scheduling and rolling horizon policy analysis in make-to-order supply chains. *International Journal of Production Research, 52*(9), 2767–2787. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.884732

Noh, S. (2023). A hybrid metaheuristic approach for solving stochastic joint replenishment problems under service level constraints. *Applied Soft Computing*, 139, 110219. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110219

Popović, D., Radević, M., & Radivojević, G. (2024). Rešavanje problema zajedničkog poručivanja u višekanalnoj prodaji primenom genetskih algoritama. In I. Džolev, N. Medić, & V. Mučenski (Eds.), Zbornik radova 51. Simpozijuma o operacionim istraživanjima SYM-OP-IS 2024 (pp. 204–209). Tara. ISBN 978-86-6022-703-6.

Suemitsu, I., Miyashita, N., Hosoda, J., Shimazu, Y., Nishikawa, T., & Izui, K. (2023). Integration of sales, inventory, and transportation resource planning by dynamic-demand joint replenishment problem with time-varying costs. *Computers & Industrial Engineering*, 180, 109351. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109351

Wildeman, R. E., Dekker, R., & Van der Vlist, P. (1997). A metaheuristic for joint replenishment problems. *International Journal of Production Economics*, 46–47, 339–354. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(96)01407-4

DRAFT VERZIJA

DRAFT VERZIJA

MATEMATIČKO PROGRAMIRANJE

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

ODREĐIVANJE BROJA I LOKACIJA VERTIPORTA PRIMENOM MODELA CELOBROJNOG LINEARNOG PROGRAMIRANJA – PRIMER GRADA BEOGRADA

THE SELECTION OF NUMBER AND VERTIPORT LOCATIONS USING AN INTEGER LINEAR PROGRAMMING MODEL – THE CITY OF BELGRADE EXAMPLE

JELICA KOMARICA[1], FEĐA NETJASOV[2], DRAŽENKO GLAVIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, j.komarica@sf.bg.ac.rs, 0009-0008-2164-8654
[2] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, f.netjasov@sf.bg.ac.rs, 0000-0001-8762-8500
[3] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, drazen@sf.bg.ac.rs, 0000-0002-0069-2153

Rezime: *Sa uvođenjem tehnologije vertikalnog poletanja i sletanja na elektro pogon (electric Vertical Take-off and Landing – eVTOL), koncept urbane vazdušne mobilnosti (Urban Air Mobility – UAM) je napravio značajan tehnološki iskorak, nudeći inovativan pristup rešavanju saobraćajnih zagušenja izazvanih prekomernom urbanizacijom gradova. Međutim, nalazi dosadašnjih istraživanja ukazuju da njegova uspešna implementacija, u velikoj meri zavisi od infrastrukturnih lokacija (vertiporta) namenjenih operativnim i tehnološkim operacijama eVTOL vazduhoplova. Imajući to u vidu, cilj ovog rada je da pomoću modela celobrojnog linearnog programiranja (CLP), baziranog na problemu lokacije objekata, utvrdi minimalan potreban broj i lokacije potencijalnih vertiporta za realizovanje UAM usluga u urbanom području grada Beograda. Stavljajući fokus na kapacitet baterije odabranog eVTOL vazduhoplova, rezultati CLP modela ukazuju da odabir broja i lokacija vertiporta prvenstveno zavisi od njegovog maksimalnog ukupnog doleta, usled gubitka električne energije prilikom operacija poletanja i sletanja.*

Ključne reči: *Urbana vazdušna mobilnost, eVTOL vazduhoplov, Vertiport, Lokacijski problem, Celobrojno linearno programiranje*

Abstract: *With the introduction of electric vertical take-off and landing (eVTOL) technology, the concept of Urban Air Mobility (UAM) has made a significant technological leap, offering an innovative approach to addressing traffic congestion caused by excessive urbanization. However, previous research findings indicate that its successful implementation largely depends on infrastructure locations (vertiports) designated for the operational and technological activities of eVTOL aircraft. Bearing this in mind, the aim of this paper is to use an integer linear programming (ILP) model, based on the facility location problem, to determine the minimum required number and locations of potential vertiports for the deployment of UAM services in the urban area of Belgrade. Focusing on the battery capacity of the selected eVTOL aircraft, the results of the ILP model suggest that the number and locations of vertiports primarily depend on its maximum range, considering the energy loss during take-off and landing operations.*

Keywords: *Urban Air Mobility, eVTOL aircraft, Vertiport, Location problem, Integer linear programming*

1. UVODNA RAZMATRANJA

Određivanje lokacija i položaja stanica, stajališta i pristanišnih lokacija predstavlja dominantnu oblast istraživanja sa aspekta različitih vidova transporta. Poput identifikovanja lokacija autobuskih i železničkih stanica, kao i stanica za deljenje bicikala i punjenje električnih vozila, razvoj koncepta urbane vazdušne mobilnosti uticao je da sve više istraživanja bude usmereno i na donošenje odluka o lokacijama vertiporta (Lai et al., 2024). Predstavljajući pristupne i izlazne čvorove ovakvom sistemu, integracija lokacija vertiporta sa postojećom urbanom infrastrukturom predstavlja važan aspekt razvoja UAM sistema, naročito u urbanim i gusto naseljenim područjima (Nikolić et al., 2023). Shodno tome, određivanje lokacija vertiporta – specijalizovane infrastrukture za poletanje, sletanje, parkiranje i punjenje baterija eVTOL vazduhoplova, obično se sprovodi u cilju integracije vertiporta sa postojećom infrastrukturom mreže drumskih saobraćajnica, pružajući mogućnost boljeg pristupa i dostupnosti UAM usluga prevoza putnika. Sa druge strane, uzimajući u obzir infrastrukturne potrebe vertiporta, rekonstrukcija postojećih objekata poput

DRAFT VERZIJA

parkirališta, krovova zgrada, helidroma i nedovoljno iskorišćenih transportnih čvorova, mogla bi uticati kako na smanjene troškove infrastrukture, tako i na prevazilaženje problema prostornog ograničenja, čime bi se znatno ubrzala implementacija UAM sistema.

S obzirom na to da od lokacije vertiporta posledično može zavisiti potražnja, ali i troškovi i vreme putovanja potencijalnih korisnika unutar UAM sistema, neretko je slučaj da su odluke o određivanju lokacija vertiporta u funkciji minimizacije ukupnih troškova putnika, ukupnog vremena putovanja, uticaja buke i udaljenosti putnika od vertiporta, kao i maksimizacije pristupačnosti vertiporta, broja putnika, prihoda od UAM usluga i zadovoljenja transportne potražnje. Takve odluke se u postojećoj literaturi najčešće donose na osnovu upotrebe geografskih informacionih sistema (GIS), algoritma k-srednjih vrednosti (k-means) ili optimizacijom lokacije vertiporta zasnovanom na definisanim ciljevima. Međutim, iako literatura bazirana na GIS pristupu pruža značajna saznanja o pogodnim lokacijama ili područjima namenjenim vertiportima, ona ne može u potpunosti da pruži informacije o performansama UAM mreže u celini, niti o efikasnosti ostvarivanja njenih ciljeva poput zadovoljenja potražnje, minimizacije troškova ili vremena putovanja (Petit & Ribeiro, 2025). Sa druge strane, neretko je slučaj da su prilikom identifikovanja lokacija vertiporta u širokoj primeni k-means algoritmi, koji se koriste za grupisanje podataka u unapred određeni broj (k) klastera. Shodno tome, dosadašnja literatura ukazuje da se k-means algoritam koristio kao osnova za istraživanja koja pružaju značajne nalaze sa aspekta optimizacije lokacija vertiporta za realizovanje UAM usluga na zahtev, pretežno sa aspekta udaljenosti. Međutim, jedan od glavnih nedostataka k-means algoritma je to što je baziran na slučajnom početnom rešenju, što za posledicu ima značajan uticaj na kvalitet krajnjeg ishoda. Pored navedenog, u dosadašnjoj literaturi akcenat je stavljen i na primenu modela zasnovanih na maksimizaciji ili minimizaciji različitih funkcija cilja u svrhu određivanja pogodnih lokacija vertiporta, posebno u kontekstu hab lokacijskih problema (Hub Location Problem – HLP). Međutim, jedno od najčešćih ograničenja HLP modela odnosi se na njegove ograničene mogućnosti da precizno odgovori na zahteve putnika u pogledu udaljenosti između korisnika i lokacije vertiporta, kao i vremena putovanja do vertiporta (Jiang et al., 2025). S tim u vezi, odabir lokacije vertiporta se često razmatra kroz pristup problema lokacije objekata (Facility Location Problem – FLP), koji omogućava optimizaciju lokacija vertiporta uz istovremeno razmatranje različitih ciljeva, pre svega zadovoljenja potražnje, uzimajući u obzir troškovna ograničenja, vreme putovanja, dostupnost i prostornu pokrivenost urbanih područja.

Imajući u vidu navedeno, ovaj rad ima za cilj da na osnovu tehnoloških, operativnih i društvenih pretpostavki utvrdi minimalan potreban broj i lokacije potencijalnih vertiporta za realizovanje UAM usluga u urbanom području grada Beograda. U tu svrhu, ovo istraživanje se zasniva na rešavanju problema lokacije objekata, baziranom na modelu celobrojnog linearnog programiranja koji se može koristiti za rešavanje višekriterijumskih problema optimizacije lokacija vertiporta. U poređenju sa dosadašnjim istraživanjima, kod kojih je utvrđivanje lokacija vertiporta prvenstveno bilo u funkciji potražnje, troškova i vremena putovanja, cilj istraživanja predstavljenog u ovom radu jeste da, na osnovu kapaciteta baterije odabranog eVTOL vazduhoplova, odredi minimalan potreban broj i lokacije vertiporta za realizovanje UAM usluga javnog prevoza putnika.

2. METODOLOGIJA

Polazeći od izabranog modela UAM usluge javnog prevoza, zasnovanog na prevozu putnika po unapred definisanom rasporedu i duž unapred određenih ruta, prvi metodološki korak usmeren je na identifikovanje potencijalnih lokacija vertiporta u cilju opsluživanja putnika u saobraćajno zagušenom urbanom području grada Beograda. Na jednoj od predloženih lokacija, vertiport će pored uloge početnog stajališta sa funkcijom prihvata i otpreme putnika, imati i tehničko-operativnu ulogu (ulogu depoa). Pored depoa, u cilju što veće opsluženosti urbane gradske zone, vertiport čija se lokacija nalazi u suprotno orijentisanom delu grada biće unapred definisan kao obavezna stanica za prihvat i otpremu putnika, predstavljajući krajnje stajalište u UAM sistemu javnog prevoza putnika. Cilj istraživanja je formulisanje odgovarajućeg lokacijskog problema i njegov zapis u vidu odgovarajućeg matematičkog modela, uzimajući u obzir tehnološka ograničenja odabranog eVTOL vazduhoplova. Cilj problema je odrediti minimalni broj vertiporta, kao i njihove lokacije, tako da se omogući nesmetano pružanje UAM usluge prevoza putnika bez usputne dopune baterije od početnog do krajnjeg vertiporta, uključujući i povratak na početnu lokaciju (depo). Pritom se kapacitet baterije uzima u obzir kao najvažniji kriterijum.

U cilju formulisanja odgovarajućeg lokacijskog problema vertiporta, u ovom radu su usvojene sledeće grupe pretpostavki:

- **Potražnja za UAM uslugom**: na svakoj lokaciji vertiporta postoji određeni nivo potražnje za korišćenjem UAM usluga, s obzirom na to da je ovaj rad zasnovan na modelu pružanja usluge prevoza putnika prema unapred definisanom rasporedu.

DRAFT VERSION

- **Troškovi UAM koncepta:** budžetom nisu ograničeni troškovi izgradnje vertiporta i pripadajuće infrastrukture, troškovi eVTOL vazduhoplova i pružanja UAM usluge, kao i svi operativni i regulatorni troškovi.
- **Model eVTOL vazduhoplova**: eVTOL model Joby S4 je izabran za merodavan vazduhoplov. Sa maksimalnom brzinom od 322 km/h i doletom od 161 km, pretpostavka je da može da pruži efikasan prevoz putnika na relacijama kratke do srednje dužine.
- **Potencijalne lokacije vertiporta**: lokacije poput krovova tržnih centara, autobuskih i železničkih stanica, kao i neiskorišćenih zelenih površina, smatraju se pogodnim za izgradnju vertiporta (uzimajući u obzir prostranu i slobodnu površinu bez fizičkih prepreka, sa adekvatnom pristupačnošću putnicima), što je u skladu sa nalazima dosadašnjih studija.
- **Flota eVTOL vazduhoplova**: flota od tri eVTOL vazduhoplova omogući će efikasno pružanje UAM usluga prevoza putnika, imajući u vidu da je pružanje UAM usluga u ovom istraživanju bazirano na području urbane gradske zone.

2.1. Područje istraživanja

Kao posledica urbanog razvoja i konstantnog porasta broja putničkih automobila, kojih je u 2025. godini oko 665.000, Beograd se svakodnevno suočava sa saobraćajnim zagušenjima. Shodno tome, kontinuirani rast potražnje za kretanjem ukazuje na potrebu za razvojem i primenom inovativnih rešenja u oblasti održive urbane mobilnosti. Imajući u vidu da Beograd još uvek ne raspolaže adekvatnim rešenjima za postojeće saobraćajne probleme, njegova prostorna obuhvatnost, gustina naseljenosti i sve češća zagušenja, čine ga opravdanim izborom za implementaciju UAM koncepta.

U skladu sa navedenim pretpostavkama, a sve u cilju razvoja pomenutog modela, na razmatranom području je predloženo 18 potencijalnih lokacija vertiporta, ne uzimajući u obzir zonu uslovne zabrane letenja (LY R8). Potencijalne lokacije vertiporta su predložene u skladu sa zonama visoke atrakcije i intenzivnih pešačkih tokova, uključujući područja u bližoj okolini postojećih stanica i stajališta svih podsistema javnog prevoza, tržnih centara, turističkih atrakcija, gradskih parkova, kao i neiskorišćenih površina unutar urbanih naselja (Slika 1). Imajući u vidu njihov značaj prilikom razvoja modela, međusobna rastojanja potencijalnih lokacija vertiporta u ovom radu su bazirana na direktnim vazdušnim rastojanjima (Varijanta 1) i najkraćim vazdušnim rastojanjima iznad mreže drumskih saobraćajnica (Varijanta 2), predstavljajući dva varijantna scenarija.

Kako je cilj ovog rada određivanje broja i lokacija vertiporta za sprovođenje UAM usluga u svrhu smanjenja saobraćajnog zagušenja, pored navedenih pretpostavki, uzimaju se u obzir i sledeći zahtevi:

- **Lokacija početnog stajališta i depoa:** Imajući u vidu ispunjenost prostornih, funkcionalnih i bezbednosnih kriterijuma za efikasno pružanje UAM usluga unutar urbanog područja, uloga početnog stajališta i depoa namenjena je lokaciji na kojoj je predloženo da se nalazi Vertiport 3 (Slika 1).
- **Unapred definisana lokacija vertiporta:** Kako bi problem saobraćajnog zagušenja bio sveden na minimum, pretpostavka je da bi odabir jedne od lokacija vertiporta (poput lokacije Vertiporta 13) koja se nalazi na suprotno orijentisanom kraju urbanog područja tome i doprinela (Slika 1).
- **Potrošnja električne energije:** Pored potrošnje električne energije koja se generiše prilikom horizontalnog letenja, u obzir je uzet i ukupan gubitak električne energije od 10% usled svakog poletanja i sletanja, što će posledično uticati na maksimalan ukupni dolet odabranog eVTOL vazduhoplova.

2.2. Matematička formulacija problema

Problem određivanja minimalnog broja vertiporta i njihovih lokacija za realizovanje UAM usluga prevoza putnika, prema unapred definisanom rasporedu, formulisan je kao Minimal Vertiport Location Problem (MVLP) sa ograničenjem doleta. Kako je vertiporte moguće locirati samo u određenim, unapred definisanim tačkama, problem izbora lokacije vertiporta spada u diskretne lokacijske probleme. Shodno tome, prvobitno su utvrđene potencijalne lokacije vertiporta i definisan je njihov skup, označen sa N, pri čemu je $N = \{1,2, \dots 18\}$. Od navedenog broja potencijalnih lokacija iz skupa N, unapred je utvrđena početna lokacija (i_{start}) u funkciji depoa ($i_{start} = 3$) i krajnja lokacija (i_{end}) u funkciji obaveznog vertiporta ($i_{end} = 13$), čineći nepromenljiv izbor prilikom optimizacije lokacija. Potom je za svaki uređeni par lokacija $(i, j) \in N \times N$ određeno njihovo međusobno najkraće rastojanje d_{ij}, pojedinačno za oba varijantna scenarija, na osnovu čega je ponaosob definisan skup dozvoljenih veza između potencijalnih lokacija, koji je označen sa $A = \{(i,j) \in N \times N \mid i \neq j \wedge 3\ km < d_{ij} < 7\ km\}$. Bazirajući se na

DRAFT VERZIJA

minimizaciji broja i lokacija vertiporta, prilikom razvoja matematičkog modela, neophodno je definisati skup binarnih promenljivih x_i, koje imaju vrednost 1 kada je vertiport lociran na lokaciji i, i vrednost 0 u suprotnom. Takođe, uzimajući u obzir da će broj lokacija prevashodno zavisiti od njihovih međusobnih rastojanja, definisan je i skup binarnih promenljivih $y_{i,j}$, koje imaju vrednost 1 ako je veza uspostavljena između čvorova na lokaciji i i j, i vrednost 0 u suprotnom. Shodno navedenom, razmatrani problem može biti zapisan u vidu sledećeg celobrojnog linearnog programa:

$$min \sum_{i \in N} x_i \tag{1}$$

uz ograničenja:

$$\sum_{j:(i_start,j)\in A} y_{i_start,j} - \sum_{j:(j,i_start)\in A} y_{j,i_start} = 1 \tag{2}$$

$$\sum_{j:(j,i_end)\in A} y_{j,i_end} - \sum_{j:(i_end,j)\in A} y_{i_end,j} = 1 \tag{3}$$

$$\sum_{j:(i,j)\in A} y_{i,j} - \sum_{j:(j,i)\in A} y_{j,i} = 0 \qquad i \in N \setminus \{i_start, i_end\} \tag{4}$$

$$y_{i,j} \leq x_i \qquad \forall\, (i,j) \in A \tag{5}$$

$$y_{i,j} \leq x_j \qquad \forall\, (i,j) \in A \tag{6}$$

$$\sum_{(i,j)\in A} d_{i,j} \cdot y_{i,j} + \delta \cdot \left(\sum_{i \in N} x_i - 1 \right) \leq D \tag{7}$$

$$x_i \in \{0,1\} \qquad \forall i \in N \tag{8}$$

$$y_{i,j} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in A \tag{9}$$

gde je: $D -$ maksimalni ukupni dolet (161 km); $\delta -$ procenjena potrošnja električne energije od 10% pri svakom poletanju i sletanju eVTOL vazduhoplova na lokaciji vertiporta, izražena u km (16,1 km).

Cilj problema je minimizacija ukupnog broja vetriporta neophodnih za realizovanje UAM usluge (1). Ograničenjima toka (2)-(3) uslovljava se izbor lokacija vertiporta. Preciznije, ograničenje (2) obezbeđuje da iz depoa (vertiport na lokaciji $i_{start} = 3$) postoji tačno jedna veza koja polazi ka sledećoj lokaciji vertiporta, dok ograničenje (3) definiše postojanje tačno jedne veze koja ulazi u krajnju lokaciju (vertiport na lokaciji $i_{end} = 13$). Ograničenjem (4) se obezbeđuje tzv. razvnoteža toka, kojom bi eVTOL vazduhoplov imao uspostavljene veze ka ostalim lokacijama prilikom pristupa (ulaza) određenoj lokaciji i prilikom izlaza iz određene lokacije. U nastavku, ograničenjima (5)-(6) se za svaku od dozvoljenih veza između lokacija (i, j), obezbeđuje da se ta veza može uspostaviti samo ukoliko su obe lokacije (i i j), izabrane kao vertiporti. Na kraju, ograničenjem (7) se integrišu dva ključna faktora koja utiču na izbor lokacija vertiporta u skladu sa operativnim ograničenjima eVTOL vazduhoplova. Uzimajući u obzir procenjenu potrošnju električne energije od 10% pri svakom njegovom poletanju i sletanju (δ), direktno se ograničava broj lokacija koje mogu biti izabrane, imajući u vidu da ukupan zbir dužine međusobnih veza, uvećan za procenjenu potrošnju energije pri poletanjima i sletanjima (izraženo u km), ne sme biti veći od maksimalnog ukupnog doleta eVTOL vazduhoplova (D). Imajući u vidu navedeno, za rešavanje postavljenog problema, korišćen je prethodno opisan model celobrojnog linearnog programiranja, upotrebom Python 3.11 verzije softvera.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Iako je metodologijom prikazana jedna matematička formulacija, ovo istraživanje je uzelo u obzir razvoj dva strukturno ekvivalentna modela, koji se razlikuju u skladu sa dva varijantna scenarija međusobnih rastojanja potencijalnih lokacija vertiporta. Međutim, važno je istaći da prethodno prikazana funkcija cilja, zajedno sa definisanim ograničenjima, u oba modela ostaje nepromenjena.

Polazeći od početnog i obaveznog stajališta kojima su dodeljene funkcije depoa i krajnjeg stajališta redom, vertiporti na lokacijama 3 i 13 će u svakom od optimalnih rešenja modela predstavljati izabrane lokacije vertiporta. Od 16 preostalih potencijalnih lokacija vertiporta, model se suočava sa izazovom problema optimizacije lokacija vertiporta, uzimajući u obzir maksimalni ukupni dolet Joby S4 eVTOL vazduhoplova koji je zavisan od baterijskog energetskog kapaciteta. Koristeći formulisani CLP model dobijeno je 9 odgovarajućih rešenja za Varijantu 1 i 7 odgovarajućih rešenja za Varijantu 2, koja predstavljaju različite kombinacije izabranih lokacija vertiporta. Pored prikaza modelima dobijenih rešenja, Tabela 1 ukazuje i na ukupno međusobno rastojanje za svako pojedinačno rešenje koje čine izabrane lokacije vertiporta, u obe varijante.

DRAFT VERZIJA

Tabela 1: Odgovarajuća rešenja izbora lokacija vertiporta i njihova ukupna međusobna rastojanja

Odgovarajuće rešenje	Varijanta 1			Varijanta 2		
	Broj vertiporta	Lokacije vertiporta	Ukupno najkraće međusobno rastojanje	Broj vertiporta	Lokacije vertiporta	Ukupno najkraće međusobno rastojanje
1	4	3, 4, 10, 13	14,14 km	5	3, 1, 5, 14, 13	21,10 km
2	4	3, 4, 9, 13	15,26 km	5	3, 1, 5, 12, 13	21,70 km
3	4	3, 1, 9, 13	15,82 km	5	3, 1, 6, 12, 13	23,40 km
4	4	3, 16, 9, 13	17,26 km	5	3, 1, 5, 11, 13	22,80 km
5	4	3, 15, 9, 13	15,12 km	5	3, 1, 5, 10, 13	21,10 km
6	4	3, 4, 11, 13	15,72 km	5	3, 1, 6, 10, 13	22,30 km
7	4	3, 15, 7, 13	16,67 km	5	3, 1, 4, 10, 13	22,60 km
8	4	3, 16, 7, 13	18,03 km			
9	4	3, 4, 7, 13	17,68 km			

Karakteristično za sva rešenja dobijena CLP modelom, jeste da u svakom od rešenja postoji prisustvo četiri (Varijanta 1), odnosno 5 (Varijanta 2) odabranih lokacija vertiporta. Može se zaključiti da pored ograničenjima definisane dve lokacije, u prikazanim rešenjima varijaju još dve, odnosno tri, modelom izabrane iz skupa potencijalnih lokacija vertiporta. Sa druge strane, posmatrajući ukupna međusobna rastojanja po rešenjima i varijantama, uočava se njihova neznatna razlika, pri čemu u prvom slučaju najkraće ukupno međusobno rastojanje između vertiporta iznosi 14,14 km, a najduže 18,03 km, dok u drugom slučaju najkraće rastojanje iznosi 21,10 km, a najduže 23,40 km.

Poštujući navedena ograničenja, odabrane lokacije moraju biti tako raspoređene da prvo, tj. početno stajalište bude definisano u lokaciji gde se nalazi Vertiport 3, zatim sledi odabir narednih lokacija vertiporta, da bi na kraju bilo izabrano obavezno (krajnje) stajalište koje bi u datom (tzv. odlaznom) smeru bilo definisano u lokaciji gde se nalazi Vertiport 13, i obrnuto. Time bi se mogao definisati broj i lokacije vertiporta u tzv. odlaznom i dolaznom smeru, uzimajući u obzir njihova ukupna najkraća međusobna rastojanja. Shodno tome, Varijantu 1 karakteriše 6 izabranih vertiporta, dok Varijantu 2 karakteriše 9 izabranih vertiporta (Tabela 2). Iako uključuju različiti broj lokacija, u obe varijante su zadovoljeni uslovi kojima je ograničena mogućnost odabira istih vertiporta, izuzev početnog stajališta – depoa (Vertiport 3) i obaveznog (krajnjeg) stajališta (Vertiport 13).

Tabela 2: Uporedna analiza varijantnih rešenja prilikom izbora broja i lokacija vertiporta

Varijantni scenario	Smer	Lokacije vertiporta	Ukupno međusobno najkraće rastojanje	Ukupan broj vertiporta	Izabrane lokacije vertiporta	Ukupno međusobno najkraće rastojanje	Maks. dolet*
Varijanta 1	Odlazni	3, 4, 10, 13	14,14 km	**6**	3, 4, 10, 13, 9, 15, 3	29,26 km	96,6 km
	Dolazni	13, 9, 15, 3	15,12 km				
Varijanta 2	Odlazni	3, 1, 5, 14, 13	21,10 km	**9**	3, 1, 5, 14, 13, 10, 4, 15, 2, 3	48,10 km	48,3 km
	Dolazni	13, 10, 4, 15, 2, 3	27,00 km				

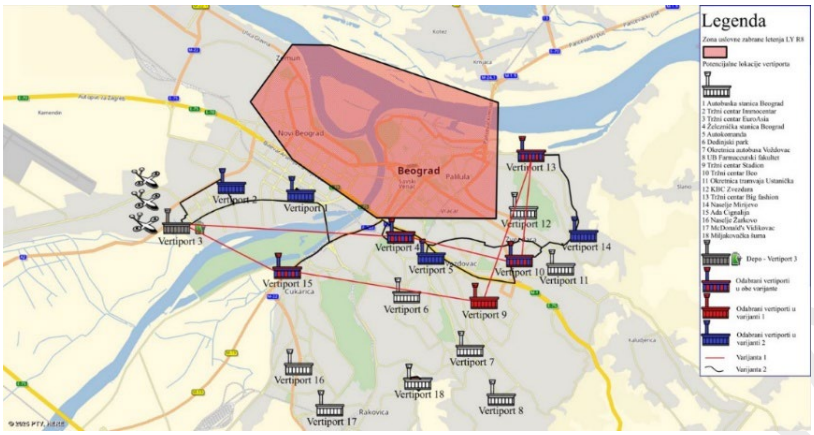
* *Usled 10% gubitka energije pri svakom poletanju i sletanju*

.

Razlika između njihovog ukupnog najkraćeg međusobnog rastojanja u direktnoj je zavisnosti od broja i lokacije izabranih vertiporta. U skladu sa tim, posmatrajući Varijantu 1, najkraće međusobno rastojanje iznosi 29,26 km, dok u slučaju Varijante 2, ono iznosi 48,10 km. Pored navedenog, od broja izabranih lokacija, direktno će zavisiti i potrošnja energije prilikom svakog poletanja i sletanja, posledično utičući na maksimalni ukupni dolet eVTOL vazduhoplova. Uzimajući u obzir da se pri svakoj operaciji poletanja i sletanja gubi 10% od ukupne energije kojom Joby S4 raspolaže, njegov početni maksimalni ukupni dolet se u skladu s tim umanjuje. S tim u vezi, maksimalan ukupni dolet usled pomenutog gubitka energije veći je u slučaju odabira manjeg broja lokacija (Varijanta 1), dok je u drugom slučaju neznatno veći od ukupnog međusobnog rastojanja izabranih lokacija vertiporta (Varijanta 2). Pored vertiporta 3 i vertiporta 13, izabrane lokacije poput vertiporta 4 (krov železničke stanice), vertiporta 10 (krov tržnog centra) i vertiporta 15 (neiskorišćeni prostor - turistička atrakcija), zajedničke su za oba varijantna rešenja. Uz to, čine 5 od ukupno 6 izabranih lokacija u Varijanti 1, i 5 od 9 izabranih lokacija u Varijanti 2. Pored navedenog, Varijanta 1 uključuje i vertiport 9 (krov tržnog centra), čime se dodatno obezbeđuje adekvatan pristup UAM sistemu, s obzirom na to da izabrane lokacije unutar ove varijante omogućavaju funkcionalnu integraciju sa drumskim vidovima prevoza. Sa druge strane, pored pomenutih 5, lokacije vertiporta kao što su vertiport 1 (parkiralište autobuske stanica), vertiport 2 (parkiralište tržnog centra), vertiport 5 (neiskorišćeni prostor u neposrednoj blizini Autokomande) i vertiport 14 (neiskorišćeni prostor u naselju Mirijevo) čine izbor lokacija vertiporta

PRE-PRINT VERZIJA

unutar Varijante 2, pružajući širu teritorijalnu pokrivenost i potencijalno veću dostupnost UAM usluga u poređenju sa Varijantom 1.



Slika 1: Potencijalne i odabrane lokacije vertiporta u oba varijantna scenarija

4. ZAKLJUČAK

Koristeći potencijal tehnologije vertikalnog poletanja i sletanja vazduhoplova na elektro pogon, ovaj rad je nastojao da na osnovu tehnoloških, operativnih i društvenih pretpostavki odredi minimalni broj vertiporta, kao i njihove lokacije, u saobraćajno zagušenom području grada Beograda, tako da se omogući nesmetano pružanje UAM usluge prevoza putnika.U tu svrhu, sprovedeno je istraživanje zasnovano na rešavanju problema lokacije objekata, formulisano kao Minimal Vertiport Location Problem (MVLP) sa ograničenjem doleta.

Usled ograničenog kapaciteta baterije, maksimalan ukupni dolet Joby S4 eVTOL vazduhoplova je primarno ograničenje modela prilikom izbora svake lokacije vertiporta. Sa pretpostavkom da će pri svakom poletanju i sletanju Joby S4 gubiti ukupno 10% energije, prilikom 6 operacija poletanja i sletanja maksimalni ukupni dolet eVTOL vazduhoplova bi iznosio 96,6 km, dok bi prilikom 9, iznosio 48,3 km. Imajući u vidu da je maksimalni ukupni dolet veći od međusobnog rastojanja izabranih lokacija u oba varijantna scenarija (29,26 km i 48,10 km, respektivno), zaključak je da su modelima izabrane lokacije vertiporta koje bi u buduće mogle biti opslužene Joby S4 eVTOL vazduhoplovom bez neophodnog dodatnog punjenja do povratka u početno stajalište.

Iako razvijeni model pruža korisnu osnovu za procenu potencijalne prostorne mreže vertiporta u urbanim sredinama, pravac budućih istraživanja bi trebalo da bude usmeren na primenu naprednijih algoritama i modela optimizacije, kao i simulacionih modela koji bi omogućili sveobuhvatniju analizu različitih scenarija u realnim uslovima. Na taj način, omogućila bi se sveobuhvatnija procena efikasnosti i opravdanosti predloženih lokacija vertiporta u saobraćajno zagušenim urbanim sredinama.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje nije imalo eksterno finansiranje.

LITERATURA

Jiang, Y., Li, Z., Wang, Y., & Xue, Q. (2025). Vertiport location for eVTOL considering multidimensional demand of urban air mobility: An application in Beijing. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 192, 104353. https://doi.org/10.1016/J.TRA.2024.104353

Lai, Y., Ma, Y., Wang, C., Volakakis, V., & Mahmassani, H. S. (2024). Vertiport Infrastructure Location Optimization for Equitable Access to Urban Air Mobility. https://doi.org/10.3390/infrastructures9120239

Nikolić, M., Netjasov, F., Crnogorac, D., Milenković, M., & Glavić, D. (2023, June). Urban air mobility: Multi-objective mixed integer programming model for solving the drone scheduling problem. In International Conference on Computational Science and Its Applications (pp. 349-362). Cham: Springer Nature Switzerland.

Petit, V., & Ribeiro, M. (2025). Multi-objective vertiport location optimization for a middle-mile package delivery framework: Case study in the South Holland Region. Journal of Air Transport Management, 125, 102757. https://doi.org/10.1016/J.JAIRTRAMAN.2025.102757

DRAFT VERZIJA

MEKO RAČUNARSTVO

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

ФОН
UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Оргинални чланак

ФАЗИ ПРИСТУП У ПРОЦЕСУ СЕЛЕКЦИЈЕ СТАРТАП ИДЕЈА

FUZZY LOGIC APPROACH TO STARTUP IDEAS SELECTION

ЗОРАН РАКИЋЕВИЋ [1], АЛЕКСАНДАР РАКИЋЕВИЋ [2], ОГЊЕН АНЂЕЛИЋ [3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, zoran.rakicevic@fon.bg.ac.rs 0000-0002-8114-7762
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, aleksandar.rakicevic@fon.bg.ac.rs 0000-0002-8917-7229
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, ognjen.andjelic@fon.bg.ac.rs 0000-0001-6390-6545

Резиме: *Упркос иницијалној позитивној процени од стране инвеститора, али и формализованој селекцији одређених програма подршке, значајан број стартап и предузетничких идеја и подухвата заврши се неуспешно већ у раним фазама развоја. Процена стартап идеја представља сложен процес експертског одлучивања у чијој реализацији помажу бројни квалитативни и квантитативни критеријуми који некада могу бити у међусобној супротности. На поузданост процеса селекције, могу утицати и критеријуми селекције али и избор методе одлучивања. У раду се најпре даје преглед значајних критеријума који се користе у процесу селекције и евалуације предузетничких и стартап идеја. Даље, приказан је пример примене фази приступа над методологијом једног јавног програма у Републици Србији који одлучивање заснива на моделу просека. Резултати примене предложеног фази приступа показали су значајне разлике у односу на методологију која је коришћена као основа и отварају простор за дискусију у вези са постојећим начинима одлучивања.*

Кључне речи: *Стартап, евалуација, селекција, вишектитеријумско одлучивање, фази логика, фази одлучивање.*

Abstract: *Despite initial positive evaluations by investors as well as formal selection through certain support programs, a significant number of startup and entrepreneurial ideas and ventures fail already in the early stages of development. The evaluation of startup ideas is a complex expert-based decision-making process, supported by numerous qualitative and quantitative criteria, which can sometimes be mutually contradictory. The reliability of the selection process can be influenced both by the selection criteria and the choice of the decision-making method. This paper first provides an overview of the key criteria used in the process of selecting and evaluating entrepreneurial and startup ideas. Furthermore, it presents an example of a fuzzy logic application to the methodology of a public program in the Republic of Serbia, which uses a basic average model for aggregation of criteria. The results of applying the proposed fuzzy approach showed significant differences compared to the original methodology and open space for discussion regarding the existing decision-making practices.*

Keywords: *Startup, evaluation, selection, multi-criteria decision-making, fuzzy logic, fuzzy decision making.*

1. УВОД

Стартап је новоосновано предузеће са високим потенцијалом за експоненцијални раст и фокусом на иновације. Стартап се често дефинише и као привремена организација осмишљена да пронађе поновљив и скалабилан пословни модел (*Blank & Dorf*, 2012). И стартапи и мала предузећа играју кључну улогу у подстицању економског раста и развоја кроз креирање нових радних места, повећање укупне стопе запослености, подстицање иновација и јачање тржишне конкуренције (*Sullivan, et al.* 2021). Суштину сваког стартапа чини предложена предузетничка идеја, која представља веома специфично интелектуално дело, као крајњи производ менталне креативности самог предузетника (*Donata & Zhou*, 2017).

Селекција идеја које треба развијати, поред њиховог идентификовања, представља кључни изазов сваког програма подршке стартапима (*Fröberg*, 2020) и често се наводи као један од главних фактора успеха у *Lean* процесу развоју иновација. Неке од најчешћих дилема и питања које настају у процесу селекције везују се управо за адекватну оцену и вредновање стартап идеја, одабир релевантних

DRAFT VERZIJA

фактора за вредновање и постизање баланса између изводљивости имплементације насупрот иновативности предложене идеје. Током последњих деценија приметни су континуирани напори истраживача да се „отвори црна кутија“ процеса вредновања стартапа, како би се идентификовали и формализовали кључни покретачи који утичу на њихову процену (*Berre & Le Pendeven*, 2023).

У процесу формалне селекције предузетничких и стартап идеја, често се користе методе вишекритеријумског оцењивања и рангирања засноване на комбинацији квалитативних и квантитативних критеријума, где поједини критеријуми некада могу бити у супротности. Поред тога, многи процеси селекције су засновани на слободној процени и субјективном мишљењу доносиоца одлуке. Неки од популарних алата и оквира за анализу су: *SWOT*, *Lean Canvas*, *Business Model Canvas*, Ниво технолошке спремности (енгл. *Technology Readiness Level - TRL*), *Scoring* модели (*Ho*, 2022; *Mişcă*, 2024; *Usmani*, 2023).

У раду је представљена могућност унапређење процеса евалуације стартап идеја коришћењем фази логике. Предложен је фази приступ који је потом тестиран на хипотетичком примеру селекције стартап идеја коришћењем методологије јавног позива *Social Impact Award*.

Рад је даље структуриран на следећи начин: друго поглавље представља преглед најзначајнијих фактора/критеријума који се користе за евалуацију стартапа; у трећем поглављу је представљена методологија предложеног приступа, док су у четвртом поглављу приказани резултати и дискусија; пето поглавље даје закључна разматрања.

2. ЕВАЛУАЦИЈА СТАРТАПА – ПРГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

Избор идеје је процес проналажења најбоље идеје за даљу реализацију из скупа мноштва идеја (*Fröberg*, 2020). Акцелератори, инкубатори, фондови ризичног капитала и програми подршке су главни актери у предузетничком екосистему, и они су активно укључени у подстицање иновација и неговање стартапова. Они кроз своје програме предлажу различите облике подршке, финансирања, образовања, умрежавања, менторства и обуке стартапова.

Процес евалуације, селекције и рангирања стартапа је од кључне важности (*Nguyen & Chu*, 2023) за одабир одговарајућих стартап идеја за финансирање и подршку. Он подразумева разматрање великог броја квантитативних и квалитативних критеријума. Најчешће коришћени критеријуми за селекцију или евалуацију (Табела 1), према различитим ауторима су: креативност, иновативност или оригиналност идеје, тржишни потенцијал идеје, квалитет описа идеје или степен разрађености идеје, пословни захтеви, стратешко уклапање са циљевима програма, техничка изводљивост решења, компетентност тима, стратешко уклапање у програм подршке и крајње вештине презентовања или pitch-овања идеје.

Tabela 1: Критеријуми селекције стартап идеја према различитим ауторима

Критеријуми селекције	Опис	Извор
Иновативност производа/услуга	Степен у којем је идеја нова, јединствена и вредна	*Afful-Dadzie & Afful-Dadzie (2016); Donata & Zhou (2017); Ebner et al. (2009); Ferrati & Muffatto (2021); Fröberg (2020); Nguyen & Chu, 2023; Skalicka et al. (2023)*
Тржишни потенцијал	Идеја има тражишну изводљивост/потенцијал за раст јер ствара и додаје вредност купцу	*Afful-Dadzie & Afful-Dadzie (2016); Donata & Zhou (2017); Ebner et al. (2009); Ferrati & Muffatto (2021); Fröberg (2020); Nguyen & Chu (2023); Skalicka et al. (2023)*
Пословна комплексност	Комплексност или једноставност реализације пословне идеје са аспекта пословних ресурса	*Afful-Dadzie & Afful-Dadzie (2016) Donata & Zhou (2017); Ebner et al. (2009); Fröberg (2020); Granz et al., (2020) Nguyen & Chu (2023)*
Техничка изводљивост	Степен у којем се решење стартапа може реално развити и имплементирати коришћењем постојеће технологије	*Afful-Dadzie & Afful-Dadzie (2016) Donata & Zhou (2017); Ferrati & Muffatto (2021); Nguyen & Chu (2023);*
Усклађеност са стратешким циљевима програма	Степен у којем се стартап усклађује са циљевима, вредностима и стратешким правцем организације, инвеститора или екосистема која га подржава	*Donata & Zhou (2017); Granz et al., (2020); Salimi & ten Have, (2024) Skalicka et al. (2023);*
Компетенције тима	Вештине, знање, искуство и способности оснивачког и развојног тима	*Afful-Dadzie & Afful-Dadzie (2016) De Mol (2019); Ferrati & Muffatto (2021); Granz et al., (2020); Nguyen & Chu (2023); Skalicka et al. (2023)*
Квалитет	Способност ефикасног презентовања идеје	*Ebner et al. (2009);*

DRAFT VERZIJA

презентације идеје	аудиторијуму	*Fröberg (2020); Mason & Stark, (2004); Parmentier (2021)*

За адекватан процес евалуације и селекције, поред избора одговарајућих критеријума, избор адекватне технике селекције такође је од кључне важности. Сам процес евалуације се често заснива на индивидуалном, групном и колективном (енгл. *crowdsourced*) доношењу одлука, као и на примени метода вишекритеријумског одлучивања уз релевантне критеријуме. Стога је рангирање стартапа проблем вишекритеријумског одлучивања (*Nguyen & Chu*, 2023). Вишекритеријумско одлучивање се представља доношење одлука у присуству вишеструких и обично супротстављених критеријума (*Kahraman et al.,* 2015), а сврха метода вишекритеријумског одлучивања је да омогуће процену више конфликтних критеријума у процесу доношења одлука (*Fröberg*, 2020).

Најчешће коришћени модели вишекритеријсмког одлучивања су модел пондерисаног оцењивања и аналитички хијерархијски процес (*Fröberg*, 2020; *Jadhav & Sonar*, 2009). Према *Poh et al.* (2001), ове методе се издвајају по једноставности, доступности података и прилагодљивости. Ahmed et al., (2023) у свом раду представља оквир за рангирање алтернатива за пословне идеје који је заснован на моделима тежинског производа и аналитичког хијерархијског процеса. *Ough* (2014) предлаже седам метода за анализу стартап идеја: *ATAR* модел (енгл. *Awareness, Trial, Availability, and Repeat Model*), Евалуацију путем контролне листе, Мапирање последица, *Delphi* техника, Анализа трошкова и користи, метода заговорника идеје (Idea advocate) и стабла одлучивања.

Lin et al. (2021) применили су приступ вишекритеријумског одлучивања заснован на неодлучном фази лингвистичком моделу (*HFL – Hesitant Fuzzy Linguistic*) ради процене стартапа из перспективе технолошког пословног инкубатора, узимајући у обзир и психолошке аспекте доносилаца одлука (*Lin et al (2021*). applied the hesitant fuzzy linguistic (HFL) multi-criteria decision-making (MCDM) approach to assess startups from the standpoint of a technology business incubator, incorporating the psychological perspectives of decision makers).

Иако су методе вишекритеријумског одлучивањапоказале високу ефикасност у решавању сложених проблема (*Dhochak & Doliya*, 2020), њихова примена у процесу селекције стартапа, нарочито када је реч о процени међусобних односа између критеријума евалуације, и даље је недовољно истражена (*Nguyen & Chu, 2023*). Поред тога, исти аутори (*Nguyen & Chu, 2023*), предлажу употребу фази приступа, ради ефективног рангирања по основу мноштва различитих критеријума који се користе за евалуацију.

3. МЕТОДОЛОГИЈА

У овом раду предложен је фази приступ у евалуацији и селекцији стартапа са идејом да се унапреди процес одлучивања у избору перспективних преузетничких и стартап идеја. Предложени приступ користи фази систем закључивања како би евалуирао и рангирао стартап идеје. У студији случаја која је представљена у раду, коришћена је методологија процеса одлучивања која је дефинисана у оквиру такмичења за најпреспективнију предузетничку идеју у домену социјалног предузетништва (*Social Impact Award*, 2024).

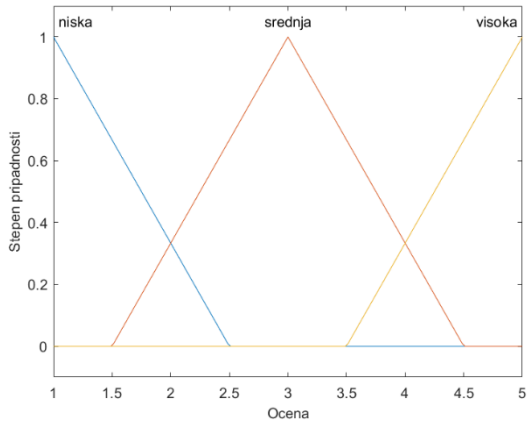
Social impact award (2024) је међународни програм за избор најбоље стартап и иновативне идеје из домена социјалног предузетништва. Програм који се реализује сваке године, подразумева процес селекције предузетничких идеја које ће касније ући у инкубацију. Селекцију врши вишечлани жири који је састављен од експерата из различитих области и дисциплина. Након иницијалне провере подобности тимова кроз скрининг предложених идеја и интервјуа са тимовима, приступа се оцењивању од стране жирија. Селекција се врши на основу три критеријума оцењивања:

- Потенцијал утицаја - предузетничке идеје које могу остварити велики утицај на друштво. Идеје које су скалабилне и могу остварити свој пун потенцијал и утицај на друштвену заједницу;
- Степен иновативности – означава новину међу идејама или проблемима које решавају. Идеје које таргетирају новооткривене проблеме такође имају изражену иновативност;
- Изводљивост и капацитет за имплементацију - процењује се на основу расположивих ресурса предузетника и његовог тима. Понекад идеје могу бити врло утицајне и иновативне али им недостаје адекватан бизнис модел или модел приходовања да би идеја буде одржива.

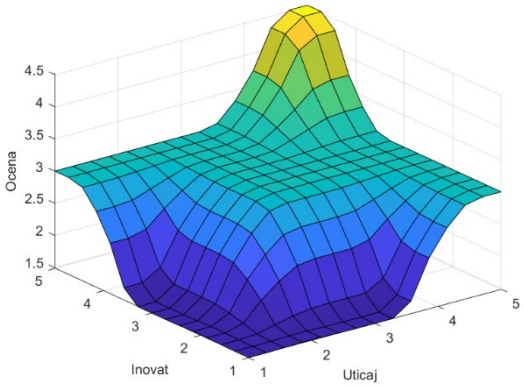
Свака предузетничка идеја бива оцењена од сваког члана жирија према оцени од 1 до 5. Све оцене чланова жирија за сваки критеријум се збрајају и генерише се просечна оцене за сваки критеријум, након чега се рачуна просечна оцена на основу сва три критеријума. На основу коначне оцене врши се рангирање стартап идеја и њихова селекција за даљи процес инкубације.

DRAFT VERSION

Настанком фази логике (Zadeh, 1965; 2008) омогућена је реално-вредносна градација у математичкој логици. Тиме је омогућен широк спектар реалне примене логичког закључивања, посебно у области одлучивања. У оквиру овог рада, примењен је фази систем закључивања (ФСЗ) како би се евалуирале стартап идеје. Предложени ФСЗ користи претходно објашњена три критеријума из методологије селекције *Social impact award (SIA)* програма као улазне променљиве за одлучивање. Као улаз се користи просечна оцена жирија (од 1 до 5) по сваком од критеријума. Свака од три улазне променљиве је описана са три троугаона фази скупа: низак [1;1;2,5], средњи [1,5;3;4,5] и висок [4,5;5;5]. Излазна променљива је оцена, и она је такође описана са претходно објашњена три троугаона фази скупа. На Слици 1 је приказан изглед фази скупова за излазну променљиву Оцена.



Слика 1: Коришћени фази скупови



Слика 2: Површина решења

Како би се успоставиле улазно-излазне релације, дефинисано је 27 ако-онда правила на основу који се врши фази закључивање. Део правила приказан је у Табели 2. Површина решења приказана је на Слици 2.

Табела 2: Ако-онда правила

Улази			*Излаз*
Утицај	**Инов.**	**Извод.**	**Оцена**
Низак	Ниска	Ниска	Ниска
Низак	Ниска	Средња	Ниска
Низак	Ниска	Висока	Ниска
...	...	...	...
Низак	Средња	Средња	Ниска
Низак	Средња	Висока	Средња
...	...	...	...

Улази			*Излаз*
Утицај	**Инов.**	**Извод.**	**Оцена**
Средњи	Висока	Ниска	Средња
Средњи	Висока	Средња	Средња
Средњи	Висока	Висока	Висока
...	...	...	...
Високи	Висока	Ниска	Средња
Високи	Висок	Средња	Високи
...	...	...	...

4. РЕЗУЛТАТИ

Класичан приступ евалуацији стартапа и фазификован приступ су примењени на хипотетичком примеру 10 стартап идеја које је потребно евалуирати. За сваки стартап генерисано је пет оцена (за сваког експерата који оцењује) по сваком од критеријума. У Табели 3 приказане су добијене просечне оцене за сваки од критеријума. Примери су дефинисани тако да укажу на потенцијалне проблематичне ситуације које могу израсти из недостатака одлучивања заснованог на просеку. Поред улазних оцена, у Табели 3 су приказани и резултати добијени помоћу *SIA* методологије, као и кроз предложени фази приступ.

Табела 3: Резултати

Алтернатива	*Улазне променљиве*			*SIA методологија*		*Фази приступ*	
	Утицај	**Иноват.**	**Изводљ.**	**Просек**	**Ранг**	**Оцена**	**Ранг**
Идеја 1	4,60	4,60	4,20	4,4667	1	4,5064	1
Идеја 2	4,20	4,40	4,80	4,4667	1	4,4146	2
Идеја 3	2,20	5,00	4,80	4,0000	3	3,8231	4
Идеја 4	5,00	4,80	2,00	3,9333	4	3,5086	5

DRAFT VER

Идеја 5	4,20	4,80	2,80	3,9333	4	3,8233	3
Идеја 6	4,00	3,60	4,20	3,9333	4	3,3891	6
Идеја 7	3,80	4,00	4,00	3,9333	4	3,3865	7
Идеја 8	4,00	3,00	3,20	3,4000	8	3,0000	8
Идеја 9	1,40	3,60	4,00	3,0000	9	2,5493	9
Идеја 10	1,60	3,60	3,80	3,0000	9	2,3859	10

Анализом резултата види се да иако Идеје 1 и 2 имају исту просечну оцену, а самим тим и ранг у *SIA* методологији, предложени фази приступ је успео да их раслоји и одреди „бољу“ алтернативу. До раслојавања је дошло због тога што Идеја 1 има мање осцилације у оценама, тј. има уједначеније оцене које у највећој мери припадају скупу високих оцена, због чега највећи значај за евалуацију има правило: *АКО је Утицај=Висок и Иноват.=Висока и Изводљ.=Висока ОНДА је Оцена=Висока*.

Даље, Идеје 4 до 7 имају исте просечне оцене и самим тим исти ранг у *SIA* методологији. Фази приступ је и овде дао занимљиве резултате. Испоставља се да предложени фази приступ највише рангира Идеју 5, чак боље и од Идеје 3 која има вишу просечну оцену. Идеја 5 је боље рангирана од Идеја 6 и 7 јер има две оцене (Утицај=4,2 и Иновативност=4,8) које су више припадају скупу Високих оцена. Са друге стране, Идеја 5 је боље рангирана од Идеја 3 и 4 јер њена најнижа оцена (Изводљивост=2,8) у мањој мери припада скупу Ниска оцена и самим тим у мањој мери активира правило које негативно утиче на коначну оцену: *АКО је Утицај=Висок и Иноват.=Висока и Изводљ.=Ниска ОНДА је Оцена=Средња*.

Коначно, предложени фази приступ боље рангира Идеју 9 од Идеје 10 због тога што према два критеријума (Иновативност и Изводљивост) имају припадност Средњој и Високој оцени (Идеја 9 има већу припадност Високој оцени и због тога предност), а по само једном Нискоj и Средњој.

5. ЗАКЉУЧАК

Основни циљ рада био је приказ унапређења класичног начина евалуације стартапа који је заснован на моделу просечних вредности, помоћу примене модела заснованог на фази логици. Основни проблем модела заснованих на просеку јесте могућност међусобне компензације у вредности критеријума одлучивања. Насупрот томе, фази системи одлучивања дају могућност контроле и усмеравања могућности међусобне компензације критеријума, што даје већу флексибилност моделу и слободу доносиоцу одлуке да модел прилагоди својим потребама. Са друге стране, ова флексибилност и слобода могу произвести проблем уколико доносилац одлуке нема довољно искуства и није у стању да на адекватан начин дефинише правила закључивања и фази скупове. У тим ситуацијама је мање ризично користити моделе засноване на просеку.

ЛИТЕРАТУРА

Afful-Dadzie, E., & Afful-Dadzie, A. (2016). A decision making model for selecting start-up businesses in a government venture capital scheme. *Management Decision*, *54*(3), 714-734.

Ahmed, A. H., Bwisa, H. M., & Otieno, R. O. (2023). Business Selection using Multi-Criteria Decision Analysis. *IJESPG (International Journal of Engineering, Economic, Social Politic and Government*), 1(1), 41-53.

Berre, M., & Le Pendeven, B. (2023). What do we know about startup-valuation drivers? A systematic literature review. *Venture Capital*, *25*(4), 385-429.

Blank, S., & Dorf, B. (2012). *The startup owner's manual: The step-by-step guide for building a great company*. Pescadero, California: K&S Ranch Publishing Division.

Dhochak, M., & Doliya, P. (2020). Valuation of a startup: Moving towards strategic approaches. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *27*(1-2), 39-49.

Donata, S., & Zhou, Y. (2017, August). Defining Criteria for Completeness of Entrepreneurial Ideas. In *2017 International Conference on Management Science and Engineering (ICMSE)* (pp. 151-156). IEEE.

Ebner, W., Leimeister, J. M., & Krcmar, H. (2009). Community engineering for innovations: the ideas competition as a method to nurture a virtual community for innovations. *R&d Management*, *39*(4), 342-356.

Ferrati, F., & Muffatto, M. (2021). Reviewing equity investors' funding criteria: A comprehensive classification and research agenda. *Venture Capital*, *23*(2), 157-178.

ДРАФТ ВЕРЗИЈА

Fröberg, E. (2020). Exploring Idea Selection in Innovative Early-Stage Startups: A Framework for Analyzing Ideas in a Lean Development Context. Dissertation. KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM).

Granz, C., Henn, M., & Lutz, E. (2020). *Research on Venture Capitalists' and Business Angels' Investment Criteria: A Systematic Literature Review* (pp. 105–136). Springer, Cham

Ho, H., Wu, J. Z., Khakifirooz, M., & Fathi, M. (2022). An Integrated Model of Scenario Planning, Business Model Canvas, and Financial Modeling for the Early-stage Enterprise Valuation. *Business Model Canvas, and Financial Modeling for the Early-Stage Enterprise Valuation (October 4, 2022)*.

Jadhav, A., & Sonar, R. (2009, December). Analytic hierarchy process (AHP), weighted scoring method (WSM), and hybrid knowledge based system (HKBS) for software selection: a comparative study. In *2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology* (pp. 991-997). IEEE.

Lin, M., Chen, Z., Chen, R., & Fujita, H. (2021). Evaluation of startup companies using multicriteria decision making based on hesitant fuzzy linguistic information envelopment analysis models. *International Journal of Intelligent Systems*, *36*(5), 2292-2322.

Mason, C., & Stark, M. (2004). What do investors look for in a business plan? A comparison of the investment criteria of bankers, venture capitalists and business angels. *International small business journal*, *22*(3), 227-248.

Mișcă, L.F. (2024) *Contributions to enhancing innovation through research-development-innovation projects using hybrid management methods*. PhD Thesis, National University of Science and Technology POLITEHNICA University of Bucharest. Doctoral School of Industrial Engineering and Robotics.

Nguyen, H. T., & Chu, T. C. (2023). Ranking Startups Using DEMATEL-ANP-Based Fuzzy PROMETHEE II. Axioms, 12(6), 528.

Ough, K. (2014). 7 Methods for Analyzing Your Great Idea Before You Bet the Company on It. *Entrepreneur*. October 22. Link: https://www.entrepreneur.com/article/238425

Parmentier, G., Loarne-Lemaire, S. L., & Mellard, M. (2021). Do We Really Judge the Book by Its Cover? Idea Selection during Start-Up Weekends. In *Organizing Creativity in the Innovation Journey* (pp. 231-247). Emerald Publishing Limited.

Poh, K. L., Ang, B. W., & Bai, F. (2001). A comparative analysis of R&D project evaluation methods. R&D Management , 31(1), 63-75

Kahraman, C., Onar, S. C., & Oztaysi, B. (2015). Fuzzy multicriteria decision-making: a literature review. *International journal of computational intelligence systems*, *8*(4), 637-666.

Raising Stars Program (2024). *Pre-seed Starup program*. Science technology park Belgrade. Link: https://ntpark.rs/en/raising-starts-en/

Salimi, N., & ten Have, G. R. (2024). Aiding philanthropic venture capitalists investing in social enterprises: A multi-criteria decision-making approach. *Journal of Philanthropy and Marketing, 29(1), e1834.*

Skalicka, M., Zinecker, M., Balcerzak, A. P., & Pietrzak, M. B. (2023). Business angels and early stage decision making criteria: Empirical evidence from an emerging market. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, *36*(1), 25-50.

Social Impact Award Program (2024). *Early stage social entrepreneurship support program*. Link: https://serbia.socialimpactaward.net/o-programu/

Sullivan, D. M., Marvel, M. R., & Wolfe, M. T. (2021). With a little help from my friends? How learning activities and network ties impact performance for high tech startups in incubators. *Technovation*, *101*, 102209.

Usmani, F., Sarim, M., & Ghayas, A. (2023). Analysis of Startup Valuation Methods: Understanding the Investor's Perspective. In *A Practical Guide for Startup Valuation: An Analytic Approach* (pp. 129-145). Cham: Springer Nature Switzerland.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. Information and control, 8(3), 338-353.

Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic?. Information sciences, 178(13), 2751-2779.

DRAFT VERZIJA

NAUKA O PODACIMA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

LLM + DEX: BRŽA I OBJAŠNJIVA KONSTRUKCIJA HIJERARHIJSKIH MODELA ODLUČIVANJA

LLM + DEX: FASTER AND EXPLAINABLE CONSTRUCTION OF HIERARCHICAL DECISION-MAKING MODELS

SANDRO RADOVANOVIĆ[1], BORIS DELIBAŠIĆ[1], MARKO BOHANEC[2], MILIJA SUKNOVIĆ[1]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd,
[sandro.radovanovic,boris.delibasic,milija.suknovic]@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-9975-8844
[2] Institut Jožef Stefan, Ljubljana, marko.bohanec@ijs.si, 0000-0003-4317-2833

Rezime: *Ovaj rad istražuje mogućnosti integracije velikih jezičkih modela u DEX metodologiju za višekriterijumsko odlučivanje. DEX modeli su interpretabilni, hijerarhijski organizovani sistemi odlučivanja zasnovani na kvalitativnim pravilima i preferencijalnoj logici, ali njihova izgradnja zahteva vreme i ekspertsko znanje. Sa druge strane, LLM modeli, poput ChatGPT, poseduju sposobnost razumevanja i generisanja strukture odlučivanja na osnovu opisa problema i podataka. U ovom radu predlažemo metod koji koristi LLM za izbor relevantnih atributa, konstrukciju hijerarhije nadkriterijuma i generisanje semantičkih objašnjenja, dok se pravila odlučivanja uče iz podataka uz poštovanje uslova monotonosti. Na eksperimentalnom primeru modelovanja rizika skijaških povreda, pokazujemo da ovako dobijeni modeli postižu performanse uporedive sa DIDEX modelom i klasičnim modelima mašinskog učenja, uz značajno bržu izradu i veću interpretabilnost. Predloženi pristup otvara mogućnosti za dalju automatizaciju i razvoj inteligentnih agenata za donošenje odluka.*

Ključne reči: *Veliki jezički modeli, DEX, Interpretabilni modeli odlučivanja, Sistemi za podršku odlučivanju.*

Abstract: *This paper explores the possibilities of integrating Large Language Models into the DEX methodology for multi-criteria decision-making. DEX models are interpretable, hierarchically organized decision systems based on qualitative rules and preferential logic, but their construction requires time and domain expertise. On the other hand, LLMs, such as ChatGPT, possess the ability to process text and generate decision structures based on problem descriptions and data. In this paper, we propose a method that uses LLMs to select relevant attributes, construct a hierarchy of aggregate criteria, and generate semantic explanations, while decision rules are learned from data with monotonicity constraints. On an experimental case of ski injury risk modeling, we demonstrate that the resulting models achieve performance comparable to the DIDEX model and standard machine learning models, with significantly faster development and improved interpretability. The proposed approach opens opportunities for further automation and the development of intelligent agents for decision-making support.*

Keywords: *Large language models, DEX, Interpretable decision models, Decision support systems.*

1. UVOD

Sistemi za podršku odlučivanju (eng. *Decision Support Systems*, ili skraćeno *DSS*) predstavljaju računarske alate namenjene pomaganju ljudima u donošenju odluka u složenim i neizvesnim uslovima (Burstein et al., 2008). Za razliku od automatizovanih sistema odlučivanja koji samostalno generišu rešenja, *DSS* sistemi imaju ulogu podrške ili asistenta, tj. oni korisnicima pružaju strukturisane informacije, analitičku podršku i logičke okvire, ali krajnja odluka ostaje u rukama čoveka. Uloga ovih sistema posebno dolazi do izražaja kada je potrebno doneti odluku u domenu gde ne postoje jednostavne metrike uspeha, gde su vrednosti subjektivne, a ciljevi međusobno konfliktni (Turban et al., 2015). Primena *DSS* sistema obuhvata širok spektar oblasti, od strateškog menadžmenta i javne uprave (Delibašić, Radovanović, and Vukanović, 2023), do agronomije, zdravstva i obrazovanja. U svim tim slučajevima, zajednički imenilac je potreba da se prikupe, obrade i povežu različiti izvori podataka, ekspertska znanja i preferencije donosioca odluke (Turban et al., 2015). Potom, umesto da zameni ljudsko razmišljanje, *DSS* sistemi bi trebalo da su dizajnirani da ga ojačaju, pritom obezbeđujući transparentnost, doslednost i sistematičnost u procesu donošenja odluka.

DRAFT VERZIJA

Takođe, u poređenju sa pristupima baziranim na mašinskom učenju, koji su usmereni na otkrivanje zakonitosti u podacima i koji često funkcionišu kao "*crne kutije*", sistemi za podršku odlučivanju su usmereni na interpretabilnost, strukturiranost i logički zasnovano modelovanje znanja (Bohanec, 2021). Stoga, *DSS* sistemi kao što je *DEX* (Decision EXpert) oslanjaju se na eksplicitno definisane kriterijume, hijerarhije i pravila odlučivanja, omogućavajući korisnicima uvid u tok zaključivanja, kao i razloge iza svake preporuke. Na taj način, *DSS* podržava proces donošenja odluka ne samo kroz rezultate, već i kroz razumevanje i objašnjenje. U radu (Bohanec, 2021), istaknuto je da bi kvalitetan sistem za podršku odlučivanju trebalo da zadovolji takozvanih *5C* uslova. To su: ***tačnost*** (eng. *Correctness*), odnosno da bi svaki *DSS* trebalo da pruža tačne i validne informacija relevantne za problem odlučivanja; ***potpunosti*** (eng. *Completeness*), tj. da su obuhvaćeni svi relevantni aspekati problema, kao i da sistem pruža odgovor za sve moguće ulaze; ***doslednost*** (eng. *Consistency*), misleći da postoji logička i preferencijalna usklađenost modela; ***razumljivost*** (eng. *Comprehensibility*) koja se odnosi na lakoću kojom korisnik može razumeti predstavljene informacije; i ***prikladnost*** (eng. *Convenience*) odnoseći se na dostupnost i pravovremenost informacija, prilagođenih konkretnom zadatku i korisniku.

Uprkos jasnim kriterijumima kvaliteta, izgradnja *DSS* sistema, tačnije *DEX* modela, koji zadovoljavaju svih *5C* zahteva predstavlja značajan izazov. Potrebno je vreme, specifično znanje za domen problema i pažljivo modeliranje kriterijuma, pravila i hijerarhija odlučivanja. Ovaj proces često zahteva intenzivnu saradnju između eksperata i modelara, što ograničava skalabilnost i brzinu razvoja ovakvih sistema.

Sa druge strane veliki jezički modeli (eng. *Large Language Models*, skraćeno *LLM*), poput *ChatGPT*-ja ili *DeepSeek*-a, nude potencijalno rešenje za ove izazove. Zahvaljujući sposobnosti razumevanja prirodnog jezika, analiziranja problema i generisanja relevantnog sadržaja, *LLM* modeli mogu pomoći u formulisanju kriterijuma, strukturiranju modela i čak u simulaciji procesa odlučivanja. Na taj način, *LLM* može značajno smanjiti trošak i kompleksnost izrade *DSS* sistema, ubrzati njihov razvoj i učiniti ih dostupnijim široj grupi korisnika. Ovaj rad predstavlja početni, pozicioni korak ka istraživanju mogućnosti integracije velikih jezičkih modela u proces izgradnje *DEX* sistema za podršku odlučivanju. Cilj rada je da identifikuje potencijalne tačke povezivanja između ove dve paradigme i otvori prostor za dalja istraživanja u pravcu automatizacije i proširenja *DSS* metodologije kroz savremene alate veštačke inteligencije.

2. TEORIJSKE OSNOVE

U ovom delu opisani su ukratko *DEX* metodologija i veliki jezički modeli, te je diskutovana njihova komplementarnost.

2.1. Metodologija DEX

Jedan od najpoznatijih i najprimenjivanijih pristupa u okviru sistema za podršku odlučivanju jeste *DEX* metodologija. *DEX* (eng. *Decision EXpert*) je metod višekriterijumske analize zasnovan na simboličkom, kvalitativnom modelovanju, koje omogućava izražavanje znanja specifičnih za domen kroz hijerarhijsku strukturu atributa i logički definisana pravila odlučivanja (Bohanec, 2022). Za razliku od kvantitativnih metoda, *DEX* koristi diskretne (kategoričke ili verbalne) vrednosti kriterijuma, čime omogućava donošenje odluka čak i u situacijama kada precizni numerički podaci nisu dostupni ili nisu poželjni. Iako se nekada korišćenje isključivo kvalitativnih skala vrednosti može smatrati nedostatkom, način na koji ljudi percepiraju vrednosti kriterijuma najčešće jesu u vidu kategorija vrednosti zbog nedostatka kognitivnih mogućnosti da posmatraju i porede veliki broj različitih vrednosti (Moscati, 2021). Sa druge strane, moguće je i iz podataka, ako su dostupni, odrediti kategorije vrednosti i njihovu orijentaciju (Radovanović, Bohanec, and Delibašić, 2023).

DEX modeli se sastoje od atributa, tj. kriterijuma, koji su organizovani u vidu stablu odlučivanja, gde se složeni kriterijumi (nadkriterijumi) formiraju agregacijom jednostavnijih (ulaznih ili drugih složenih) kriterijuma, dok je u korenu stabla ciljni atribut, odnosno atribut u kojem se donosi odluka. Svaki složeni atribut ima pridruženu tabelu pravila odlučivanja (eng. *decision table*), koja definiše izlaznu vrednost na osnovu kombinacija ulaznih vrednosti njegovih podatributa. Na taj način, model funkcioniše kao sistem lokalno definisanih pravila koji se evaluira odozdo-nagore kroz hijerarhiju, sve do konačne odluke ili preporuke. Zapravo, tabela pravila odlučivanja ima ulogu računanja korisnosti alternative za zadati kriterijum ili ciljni atribut, te kao takav ima ulogu kompozitnog indikatora koji predstavlja očekivanu korisnost alternative (za zadati kriterijum ili ciljni atribut).

Ključna karakteristika *DEX* metodologije je uređenost vrednosti atributa, što znači da su vrednosti svakog atributa raspoređene u logički niz (npr. *loš*, *srednji*, *dobar*) koji odražava preferencije korisnika. Ova uređenost omogućava primenu pravila konzistentnosti i preferencijalne logike, čime se osigurava da model bude stabilan, predvidiv i u skladu sa očekivanjima korisnika (Bazerman and Moore, 2012). Upravo zbog ove osobine, *DEX* modeli su naročito pogodni za situacije u kojima su transparentnost i interpretabilnost odluke od presudne

RADNA VERZIJA

važnosti. Bitno je napomenuti da korisnik može koristiti i neuređene skale vrednosti, ali u tom slučaju nije moguće primenjivati pravila konzistentnosti.

2.2. Veliki jezički modeli

Drugi aspekt koji analiziramo su veliki jezički modeli. Oni predstavljaju napredne modele veštačke inteligencije trenirane na ogromnim količinama tekstualnih podataka sa ciljem da razumeju, generišu i transformišu prirodni jezik. Kao takvi, zasnovani na arhitekturi transformera i sposobni su da proizvode koherentan i kontekstualno relevantan tekst, odgovaraju na pitanja, sažimaju sadržaj, formulišu predloge i vode dijalog na način sličan čoveku (Naveed et al., 2023). Ono što ih posebno izdvaja kao alate u poređenju sa drugim alatima veštačke inteligencije je njihova mogućnosti koja ne proističe iz eksplicitno programiranih pravila, već iz učenja zakonitosti i značenja iz velikog korpusa tekstova, te se neretko kaže da su u stanju da "prevare"čoveka da razgovara sa drugim čovekom, tj. da su položili su Tjuringov test (Jones and Bergen, 2025).

Pored toga što funkcionišu kao generativni modeli, veliki jezički modeli se sve više posmatraju i kao *sistemi za upravljanje znanjem*, jer u svojoj strukturi implicitno integrišu ogromnu količinu činjenica, pojmova i odnosa između njih (He et al., 2024). Iako nisu klasične baze znanja, *LLM* modeli mogu obavljati zadatke kao što su ekstrakcija informacija, povezivanje pojmova, preformulisanje i organizacija znanja, čime postaju funkcionalni alati za rad sa složenim informacijama. Zapravo, sistemi za upravljanje znanjem obuhvataju procese prikupljanja, organizovanja, skladištenja i distribuiranja znanja unutar organizacije ili ekspertskog sistema (Akerkar and Sajja, 2009). Kao takvi, sistemi za upravljanje znanjem se oslanjaju na strukturirane baze podataka, ontologije ili ekspertna pravila kako bi omogućili efikasno pronalaženje i primenu relevantnih informacija, i posledično donošenje odluka. Nasuprot tome, *LLM*-ovi predstavljaju drugačiji pristup modelovanja i upravljanja znanjem. *LLM*-ovi ne upravljaju znanjem eksplicitno, već ga modeluju implicitno kroz zakonitosti u podacima i semantičke relacije naučene iz ogromnog korpusa tekstualnih podataka. Uprkos tome što ne poseduju eksplicitno strukturiranu bazu znanja kao klasični sistemi, *LLM*-ovi se mogu funkcionalno posmatrati kao alati za upravljanje znanjem jer poseduju sve aktivnosti koje jedan sistem za upravljanje znanjem mora da poseduje. Zahvaljujući sposobnosti da razumeju i generišu tekst, *LLM* modeli mogu izdvajati relevantne informacije iz neformalnih opisa, identifikovati kriterijume, definicije, čak i uzročno-posledične veze (Meng et al., 2022) što odgovara osobinama **ekstrakcije znanja**, **povezivanje pojmova** i **strukturiranju informacije**. Osim toga, *LLM* modeli mogu generisati i **objašnjavati znanje**, formulišući sažetke, alternativne formulacije i preporuke, čime olakšavaju prenos i deljenje znanja između učesnika u procesu odlučivanja. Ipak, pri korišćenju *LLM*-ova potrebno je biti veoma oprezan, jer su u stanju da generišu uverljive, ali netačne ili izmišljene informacije. To je fenomen poznat kao *halucinacija* ili *konfabulacija* modela (Barros, 2025).

U kontekstu sistema za podršku odlučivanju, navedene sposobnost *LLM*-a se mogu iskoristiti za generisanje kriterijuma, objašnjenja, pa čak i pravila odlučivanja, čime se *LLM* pozicionira kao alat za podršku donosiocima odluka pri konstrukciji i razumevanju modela odlučivanja. Međutim, ukoliko imamo dostupne podatke o problemu koji rešavamo, možemo pronaći kombinaciju u kojoj ćemo uzeti najbolje iz oba sveta. Velike jezičke modele da pomognu u konstruisanju hijerarhije kriterijuma, a podatke da popunimo tabelu pravila odlučivanja.

3. KOMBINOVANJE LLM-A I DEX METODOLOGIJE

U ovom radu želimo da predložimo modifikaciju *DIDEX* (Radovanović, Bohanec, and Delibašić, 2023) metodologije koja je kompletan postupak pravljenja *DEX* modela zasnivala na istorijskim podacima. U ovom istraživanju želimo da pomognemo postupak korišćenjem *LLM* modela. Tačnije, predloženi pristup se oslanja na integraciju *LLM*-ova i formalnog okvira DEX metodologije za generisanje hijerarhije modela odlučivanja zasnivajući se na neformalnom opisu problema, ali i dostupnim podacima. Model koristi sposobnost *LLM*-a da na osnovu opisa problema i atributa automatski predloži strukturisanu hijerarhiju kriterijuma, kao i semantički opravdana imena i objašnjenja za nove, složene atribute. Ovaj korak je srž *DEX* metodologije i vremenski najzahtevniji korak (Bohanec, 2022), kao i računski najkompleksniji u *DIDEX* metodologiji (Radovanović, Bohanec, and Delibašić, 2023).

Proces započinje tako što korisnik definiše *opis problema*, kao i *opis podataka*, gde svaki atribut ima naziv i kratak opis. *LLM* se tada koristi kao domenski ekspert koji, na osnovu datog opisa i značenja atributa, identifikuje koje atribute treba uključiti u model i kako ih međusobno povezati u strukturisanu formu. Odnosno, prvi korak je **izbor informativnih kriterijuma**. Formalno, putem strukturnog izlaza koji neki *LLM*-ovi podržavaju podskup, *LLM* (tj. virtuelni donosilac odluke) bira podskup od najviše k atributa koji su najznačajniji za konkretan problem odlučivanja. Ovaj postupak je veoma bitan jer *DEX* modeli bi trebalo da predstavljaju dovoljno kompleksne, ali ne previše kompleksne modele odlučivanja. Prosleđivanjem ogromnog broj kriterijuma rezultujući *DEX* model ne bi bio razumljiv donosiocima odluke zbog ili prevelike dubine hijerarhije ili zbog prevelikih tabela pravila odlučivanja koja će se neminovno pojaviti sa velikim brojem atributa.

DRAFT VERSION

Nakon izbora informativnih kriterijuma, u narednim iteracijama *LLM* predlaže **spajanje parova kriterijuma** u nove, složene kriterijume. Svaki predlog sadrži: (1) nazive dva kriterijuma za spajanje, (2) novo ime agregiranog kriterijuma i (3) tekstualno objašnjenje koje opisuje semantičku povezanost između izabranih kriterijuma i opravdanost njihove integracije. Na taj način, model gradi hijerarhiju odozdo nagore, sve dok se ne dobije jedinstven atribut na vrhu koji predstavlja konačnu odluku. Kako bismo obezbedili da *LLM* uvek vraća iste rezultate, korišćen je OpenAI GPT 4o model gde je temperatura spuštena na vrednost veoma bliskoj nuli (0,001).

Nakon definisanja strukture *DEX* modela, svaki čvor u hijerarhiji predstavlja agregaciju dva kriterijuma, za koje je potrebno **konstruisati tabelu pravila odlučivanja**. Pravila se uče direktno iz podataka, uz poštovanje uslova monotonosti koji su svojstveni *DEX* metodologiji, što znači da se povećanjem vrednosti ulaznih kriterijuma ne sme doći do degradacije izlazne vrednosti.

Za izbor najboljeg izlaza za svaku kombinaciju vrednosti atributa koristi se verovatnoća izlazne klase (eng. *Class Confidence Proportion*), koja je definisana kao:

$$p(c \mid a,b) = \frac{N_{abc}}{N_{ab}} \tag{1}$$

gde je N_{abc} broj instanci sa kombinacijom vrednosti a i b koje pripadaju klasi c, dok je N_{ab} ukupan broj instanci sa tom kombinacijom ulaza.

Da bi se postigla stabilnost i robustnost pravila, dodatno se koristi *donja granica pouzdanosti* (eng. *Lower Confidence Bound*, skraćeno *LCB*) za proporciju p, prema Vilsonovoj formuli (Rink and Brannath, 2025):

$$\mathrm{LCB}(p) = \frac{p + \frac{z^2}{2n} - z\sqrt{\frac{p(1-p)}{n} + \frac{z^2}{4n^2}}}{1 + \frac{z^2}{n}} \tag{2}$$

gde je z kritična vrednost standardne normalne raspodele za zadati nivo poverenja (npr. $z \approx 1.96$ za 95%), a n je broj posmatranja za datu kombinaciju ulaza. Na taj način, za svaku kombinaciju atributa bira se ona klasa c za koju je *LCB* najviši, čime se favorizuju stabilne i konzervativne odluke u uslovima male frekvencije podataka.

Nakon konstruisanja svake tabele pravila, a zarad očuvanja doslednosti u odlučivanju i preferencijalne konzistentnosti (što je ključno za *DEX* modele), vrši se provera i korekcija radi obezbeđivanja *monotonosti* pravila odlučivanja.

Trebalo bi napomenuti ovo nije prvi pristup u kombinovanju *LLM*-ova i *DEX* metodologije, već da postoji rad (Radovanović, Delibašić, and Vukanović, 2024) koji koristi *LLM* da konstruiše hijerarhiju u potpunosti, a tabele pravila odlučivanja se konstruišu iz podataka. Predložena metodologija u ovom radu se razlikuje zato što se hijerarhija konstruiše iz većeg broja uzastopnih upita *LLM*-a, te konstruisanje strukturnog izlaza i, na kraju, promenama u pravljenju tabela pravila odlučivanja koja obezbeđuju preferencijalnu konzistentnost, a koriste *LCB* kao metoda za određivanje vrednosti izlaza ciljnog atributa ili nadkriterijuma.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

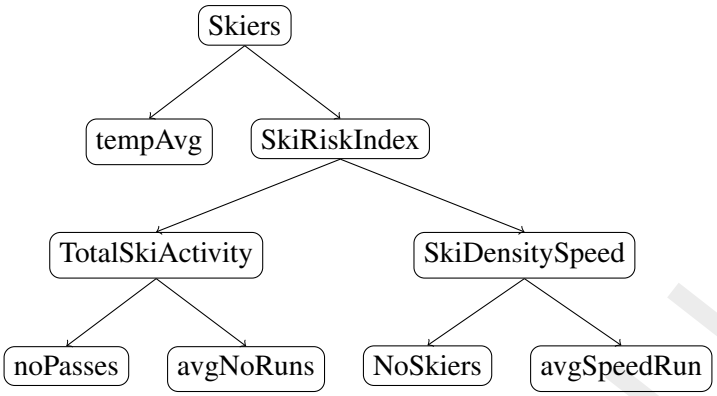
U cilju poređenja modela i rezultata, koristili smo identične podatke i identičnu postavku kao u (Radovanović, Bohanec, and Delibašić, 2023). Odnosno, koristili smo podatke o povreda skijaša na skijalištu Kopaonik u pet uzastopnih sezona. Podaci opisuju karakteristike skijališta, vremenske uslove i nivo aktivnosti korisnika i to su:

1. numSkiers – broj skijaša na skijalištu dnevno,
2. numPasses – broj transporta žičarom,
3. utilization – iskorišćenost kapaciteta žičara,
4. avgNoRuns – prosečan broj vožnji po skijašu,
5. avgAvgTimeRun, avgMinTimeRun, avgMaxTimeRun – različiti aspekti vremena koje skijaši provode u jednoj vožnji,
6. avgAvgElevation, avgMinElevation, avgMaxElevation – vertikalna dužina spusta,
7. avgSpeedRun – prosečna brzina skijanja,
8. tempAvg – prosečna dnevna temperatura,
9. windSpeed – brzina vetra,
10. cloudiness – oblačnost (na skali od 0 do 10),
11. numInjuries – broj prijavljenih povreda na dnevnom nivou podeljene u tri kategorije.

Takođe smo, kao i u originalnom radu, koristili diskretizaciju sa jednakim brojem instanci po kategoriji (eng. *equal size binning*) kako bismo dobili stabilnija pravila odlučivanja. Odnosno, podrška (eng. *support*) svakog pravila bi trebalo da je veća ovim pristupom u poređenju sa drugim metodoma diskretizacije, čime se povećava pouzdanost dobijenih odluka.

DRAFT VERZIJA

Rezultati su evaluirani upotrebom desetostruke unakrsne validacije (eng. *cross validation*) gde su merene tačnost, preciznost, odziv i F1 mera. Prilikom izbora informativnih atributa, isprobane su verzije sa od 5 do 7 kriterijuma, a u radu ćemo prikazati samo model sa 5 kriterijuma (koja je prikazana na Slici 1:) kako bi bio uporediv sa modelom dobijenim u (Radovanović, Bohanec, and Delibašić, 2023).



Slika 1: *LLM* dobijena *DEX* hijerarhija

U poređenju sa *DIDEX* modelom iz prethodnog rada, novi model zasnovan na *LLM*-u koristi sličan skup ulaznih atributa, ali uz određene razlike u njihovom izboru i organizaciji. Dok *LLM* model koristi atribute *tempAvg*, *NoSkiers*, *noPasses*, *avgNoRuns* i *avgSpeedRun*, *DIDEX* model koristi *NoSkiers*, *tempAvg*, *utilization*, *noPasses* i *windSpeed*. Odnosno, novi model modeluje vremenske uslove i rizik (kao kombinaciju skijaških aktivnosti i gustine) kao ključne faktore za rizik od skijaških povreda, dok *DIDEX* model vremenske uslove kombinuje sa brojem skijaša za modelovanje stanja skijališta, te njih sa brojem spusteva. Zapravo, skijaške povrede su veoma asocirane sa povećanom aktivnošću i gustinom skijaša na skijalištu. Naime, skijaške povrede se najčešće događaju u uslovima kada je skijalište prenatrpano i kada je rizik od sudara ili izbegavanja sudara veliki (Carus and Castillo, 2021), kada se formiraju manje grupe skijaša (Delibašić, Radovanović, Jovanović, et al., 2024) ili kada ima više neiskusnih skijaša.

Osim izbora atributa, ključna razlika ogleda se u načinu na koji su ovi atributi organizovani u hijerarhiji. *LLM* automatski konstruiše nadkriterijume *SkiActivityIndex* i *SkiDensityIndex* i daje njihova tumačenja. Ovi agregirani kriterijumi predstavljaju semantički utemeljene iz baze znanja *LLM*-a, čime donosilac odluke može da posmatra i diskutuje same izbore i time pomogne proces kreiranja *DEX* modela. Pored hijerarhijske strukture, koristeći podatke dobijamo tabele pravila odlučivanja, pri čemu su sva pravila monotona. Na kraju, u poređenju sa *DIDEX* metodologijom, ceo proces je realizovan drastično brže sa *LLM*-om.

Tabela 1: Evaluacija modela za skijaške povrede

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1
LLM - 5 kriterijuma	65.13 ± 6.34	63.51 ± 6.98	66.78 ± 5.74	63.06 ± 6.00
LLM - 6 kriterijuma	63.96 ± 5.97	63.11 ± 6.09	66.10 ± 4.62	63.13 ± 5.38
LLM - 7 kriterijuma	65.62 ± 4.43	64.54 ± 3.98	66.83 ± 4.75	64.86 ± 3.90
DIDEX[*)]	65.73 ± 12.16	64.51 ± 10.67	66.30 ± 7.37	64.07 ± 9.10
Stablo odlučivanja[*)]	63.96 ± 5.22	63.63 ± 5.50	65.72 ± 4.47	64.66 ± 5.09
Model nasumičnih stabala odlučivanja[*)]	66.27 ± 5.39	64.94 ± 5.94	67.32 ± 4.84	67.32 ± 4.34
Logistička regresija[*)]	63.32 ± 5.14	62.50 ± 5.07	63.25 ± 4.40	63.25 ± 4.62

*) Rezultati preuzeti iz (Radovanović, Bohanec, and Delibašić, 2023).

Rezultati prikazani u Tabeli 1: pokazuju da modeli zasnovani na *LLM*, u zavisnosti od broja uključenih kriterijuma, postižu performanse koje su uporedive sa *DIDEX* modelom i standardnim modelima mašinskog učenja, uključujući stablo odlučivanja, nasumične šume i logističku regresiju. Najbolji *LLM* model (sa sedam kriterijuma) postiže tačnost od $65.62\% \pm 4.43\%$, što je veoma blizu rezultatu DIDEX modela ($65.73\% \pm 12.16\%$) i nasumične šume ($66.27\% \pm 5.39\%$).

Dodatno, primećujemo da se sa povećanjem broja kriterijuma u *LLM* modelima smanjuje standardna devijacija svih evaluacionih metrika, što ukazuje na stabilnije ponašanje modela pri predikciji. Ovo sugeriše da veći broj pažljivo odabranih atributa omogućava *LLM* modelu da bolje generalizuje i pravi konzistentnije predikcije, čak i kada performanse po proseku ostanu slične.

DRAFT VERZIJA

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je metodološki okvir za integraciju velikih jezičkih modela (*LLM*) u proces konstrukcije *DEX* modela za podršku odlučivanju. Korišćenjem *LLM*-a za generisanje hijerarhije kriterijuma i objašnjenja, a zatim podataka za izgradnju tabela pravila odlučivanja, dobijen je interpretabilan, monotono-konzistentan model sa rezultatima koji su uporedivi sa savremenim pristupima mašinskog učenja. Osim što omogućava znatno bržu izradu modela u odnosu na prethodno razvijeni *DIDEX* pristup, predloženi pristup obezbeđuje veću transparentnost i lakšu komunikaciju između modela i krajnjih korisnika kroz objašnjenja koja se dobijaju iz *LLM*-a, čime zadovoljava osnovne zahteve kvaliteta odlučivanja (5C princip).

Kao pravac za budući rad, predlaže se razvoj sistema zasnovanog na više *LLM* agenata koji bi predstavljali različite aktere u procesu donošenja odluka (eng. *multi-actor decision making*). Svaki agent bi bio osposobljen da sagleda problem iz sopstvenog ugla, uz sopstvene preferencije, ograničenja i domenske pretpostavke. Kroz dijalog, razmenu argumenata i upotrebu metodologija društvenog izbora (eng. *social choice theory*), kao što su pregovaračke igre (Kramár et al., 2022), deliberacija ili (samo-)refleksivno usklađivanje mišljenja, agenti bi mogli kolektivno da dođu do kompromisnog, reprezentativnog modela odlučivanja. Ovaj pristup otvara mogućnosti za automatizaciju kompleksnih procesa odlučivanja u kontekstima sa više aktera, kao što su javne politike, zdravstvo ili strateško planiranje.

LITERATURA

Akerkar, R., & Sajja, P. (2009). *Knowledge-based systems*. Jones & Bartlett Publishers.

Barros, S. (2025). I Think, Therefore I Hallucinate: Minds, Machines, and the Art of Being Wrong. *arXiv preprint arXiv:2503.05806*.

Bazerman, M. H., & Moore, D. A. (2012). *Judgment in managerial decision making*. John Wiley & Sons.

Bohanec, M. (2021). From data and models to decision support systems: Lessons and advice for the future. In *EURO Working Group on DSS: A tour of the DSS developments over the last 30 years* (pp. 191–211). Springer.

Bohanec, M. (2022). DEX (Decision EXpert): A qualitative hierarchical multi-criteria method. In *Multiple Criteria Decision Making: Techniques, Analysis and Applications* (pp. 39–78). Springer.

Burstein, F., W Holsapple, C., & Power, D. J. (2008). Decision support systems: a historical overview. *Handbook on decision support systems 1: Basic themes*, 121–140.

Carus, L., & Castillo, I. (2021). Managing risk in ski resorts: Environmental factors affecting actual and estimated speed on signposted groomed slopes in a cohort of adult recreational alpine skiers. *Plos one*, *16*(8), e0256349.

Delibašić, B., Radovanović, S., Jovanović, M. Z., Obradović, Z., Suknović, M., & Lojić, R. (2024). A study on ski groups size and their relationship to the risk of injury. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, *238*(4), 370–381.

Delibašić, B., Radovanović, S., & Vukanović, S. (2023). A Decision Support System for Internal Migration Policy-Making.

He, Q., Wang, Y., & Wang, W. (2024). Can Language Models Act as Knowledge Bases at Scale? *arXiv preprint arXiv:2402.14273*.

Jones, C. R., & Bergen, B. K. (2025). Large language models pass the turing test. *arXiv preprint arXiv:2503.23674*.

Kramár, J., Eccles, T., Gemp, I., Tacchetti, A., McKee, K. R., Malinowski, M., Graepel, T., & Bachrach, Y. (2022). Negotiation and honesty in artificial intelligence methods for the board game of Diplomacy. *Nature Communications*, *13*(1), 7214.

Meng, K., Bau, D., Andonian, A., & Belinkov, Y. (2022). Locating and editing factual associations in gpt. *Advances in neural information processing systems*, *35*, 17359–17372.

Moscati, I. (2021). History of utility theory. *The Routledge Handbook of the Philosophy of Economics*, 23–36.

Naveed, H., Khan, A. U., Qiu, S., Saqib, M., Anwar, S., Usman, M., Akhtar, N., Barnes, N., & Mian, A. (2023). A comprehensive overview of large language models. *arXiv preprint arXiv:2307.06435*.

Radovanović, S., Bohanec, M., & Delibašić, B. (2023). Extracting decision models for ski injury prediction from data. *International Transactions in Operational Research*, *30*(6), 3429–3454.

Radovanović, S., Delibašić, B., & Vukanović, S. (2024). Combining LLM and DIDEX method to predict Internal Migrations in Serbia. *Human-Centric Decision and Negotiation Support for Societal Transitions*.

Rink, P., & Brannath, W. (2025). Post-selection confidence bounds for prediction performance. *Machine Learning*, *114*(3), 82.

Turban, E., Sharda, R., Delen, D., Aronson, J., Lian, T.-P., & King, D. (2015). *Business intelligence and analytics: systems for decision support*. Pearson.

DRAFT VERZIJA

POSLOVNA ANALITIKA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

KVANTITATIVNI MODEL ZA OPTIMIZACIJU PORTFOLIJA PROJEKATA KONTINUALNOG UNAPREĐENJA

QUANTITATIVE MODEL FOR PORTFOLIO OPTIMIZATION OF CONTINUOUS IMPROVEMENT PROJECT

MILENA GATIĆ[1], BISERA ANDRIĆ GUŠAVAC[2], BARBARA SIMEUNOVIĆ[3], DRAGANA STOJANOVIĆ[4]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, milena.gatic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-7018-3370
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, bisera.andric.gusavac@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-9438-5906
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, barbara.simeunovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-7381-9891
[4] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, dragana.stojanovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0003-1485-4552

Rezime: *Kontinualno unapređenje predstavlja značajan faktor u omogućavanju dugoročne konkurentnosti organizacije, ali izbor i prioritizacija projekata mogu biti izazovni zbog ograničenih resursa i različitih ciljeva projekata. U ovom radu razvijen je model za optimizaciju portfolija projekata kontinualnog unapređenja u organizacijama imajući u vidu razlike među kriterijumima koje se posmatraju prilikom donošenja odluka vezanih za različite tipove projekata. Kako bi se odredio značaj određenih kriterijuma korišćen je AHP. Model je testiran simulacijom u logističkoj industriji, gde je demonstrirana njegova primenjivost u realnim uslovima. Predloženi pristup omogućava bolje donošenje odluka u vezi sa inicijativama kontinualnog unapređivanja.*

Ključne reči: *Kontinualno unapređivanje, Matematički model, Portfolio projekata.*

Abstract: *Continuous improvement is a significant factor in enabling long-term organizational competitiveness, but the selection and prioritization of continious projects initiatives (projects) can be challenging due to limited resources and different project objectives. The paper proposes a model aimed at optimizing continuous improvement project portfolios in organizations, taking into account the differences in the criteria used for evaluating and selecting various types of projects. The AHP method was used to determine the importance of specific criteria. The model was tested through a simulation in the logistics industry, demonstrating its applicability in real-world conditions. The proposed approach enables better decision-making regarding continuous improvement initiatives.*

Keywords: *Continuous improvement, Mathematical model, Project portfolio.*

1. UVOD

Kontinualno unapređivanje (KU) poslovanja predstavlja ključni preduslov za uspešno i održivo poslovanje u savremenim uslovima tržišne konkurencije (Scavarda et al., 2025). Iako je značaj KU široko prepoznat, mnoge organizacije se i dalje muče sa doslednom i sistematskom primenom KU inicijativa (Scavarda et al., 2025). U svakodnevnim obavezama, uz ograničene resurse i prioritete koji se stalno menjaju, često je teško pronaći prostor za aktivnosti koje ne donose brze rezultate, ali su od suštinskog značaja za održivi razvoj organizacija.

Jedan od ključnih preduslova za uspešnu implementaciju KU inicijativa jeste uključivanje zaposlenih, kao i sprovođenje inicijativa u svim delovima organizacije (Brajer-Marczak, 2014). Istovremeno je važno održavati uravnotežen portfolio projekata kontinualnog unapređenja, koji je retkost, a podrazumeva fokus na unapređenje svih aspekata poslovanja (Kornfeld & Kara, 2011). Organizacije se svakodnevno suočavaju sa različitim izazovima i prilikama, koje se razlikuju po veličini, značaju, trajanju i strateškoj vrednosti. Ako se svi napori usmere samo na jedan cilj, recimo, smanjenje troškova, postoji rizik da se zanemare podjednako važna pitanja kao što su kvalitet, bezbednost, ekološka održivost ili zadovoljstvo korisnika. Zbog toga je neophodno da se prilikom izbora projekata obezbedi ravnoteža između kratkoročnih rezultata i dugoročnih ulaganja, kao i između tehničkih poboljšanja i promene organizacione kulture.

DRAFT VERZIJA

Jedan od izazova u ovom procesu jeste izbor i rangiranje KU projekata koje treba realizovati**.** Organizacije se često suočavaju sa velikim brojem predloga koji se razlikuju po obimu, potencijalnim efektima, potrebnim resursima i realnim mogućnostima za sprovođenje. Dodatnu složenost unosi i činjenica da odluka mora da uzme u obzir različite kriterijume, od troškova i kvaliteta, do usklađenosti sa strategijom, angažovanja zaposlenih i potencijalnih rizika.

Do sada su razvijene različite metode kako bi se pomoglo u rešavanju ovih ili sličnih problema. Autori su koristili AHP (Shaygan & Testik, 2019), DEA (Yu et al., 2022), radili su analizu koristi i napora (Chakravorty, 2012) ili se bavili modelovanjem šireg procesa odlučivanja (Salah, 2015). Iako su ovi pristupi doprineli razvoju oblasti, često im nedostaje fleksibilnost da obuhvate sve vrste projekata u različitim organizacionim jedinicama, ili ne omogućavaju objedinjeno odlučivanje u okviru jedinstvenog, optimizovanog sistema.

Zbog toga ovaj rad predlaže matematički model za izbor i prioritizaciju projekata kontinualnog unapređenja, koji se može primeniti u različitim delovima organizacije i na različite kategorije projekata. Za razliku od sličnih modela (Aqlan & Al-Fandi, 2018; Kral et al., 2019), model omogućava izbor optimalnog skupa projekata koji donose najveći ukupan benefit organizaciji, uzimajući u obzir razlike u prirodi samih projekata a samim tim i različite ciljeve koji se projektima ostvaruju. Kako bi se ilustrovala i potvrdila primenljivost modela u realnim uslovima, on je praktično testiran na projektima kompanije koja posluje u logističkom sektoru.

2. METODOLOGIJA

Razvijen je model celobrojnog programiranja čiji je cilj maksimizacija ukupne koristi (benefita) odabranih projekata, u okviru definisanih ograničenja i kriterijuma ocenjivanja.

2.1. Matematički model

Neka je:

N – Skup svih projekata koje je moguće realizovati

I – skup tipova projekata označenih sa i

J – skup odeljenja označenih sa j

P_{ij} – skup projekata tipa i koji se realizuju u odeljenju j

N^{mp}– skup obaveznih projekata, $N^{\mathrm{mp}} \subseteq N$

N^{mx}– skup međusobno isključivih projekata, $N^{\mathrm{mx}} \subset N \times N$

B – raspoloživi budžet za realizaciju projekata

C_{ij} – ukupan trošak projekta tipa i koji se realizuje u odeljenju j

x_{ij} – binarna promenjiva koja označava da li je projekat tipa i u odeljenju j izabran:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ako je projekat iz tipa } i \text{ i dodeljen odeljenju } j \\ 0 & \text{u suprotnom} \end{cases}$$

b_{ij} – benefit projekta tipa i koji se realizuje u odeljenju j

Onda je funkcija cilja maksimizacije ukupnog benefita:

$$max f(x) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} b_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

DRAFT VERZIJA

Pri ograničenjima:

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c_{ij}x_{ij} \le B \tag{2}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ij} \ge 1, \forall i \in I \tag{3}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ij} \ge 1, \forall j \in J \tag{4}$$

$$\sum_{j\in J} x_{ij} = 1, \forall i \in N^{\mathrm{mp}} \tag{5}$$

$$x_i + x_j \le 1, \forall (i,j) \in N^{\mathrm{mx}} \tag{6}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, j \in J \tag{7}$$

Prvo ograničenje (2) obezbeđuje da ukupni troškovi svih projekata ne prevazilaze budžet za KU inicijative koji definiše kompanija. Kako bi se obezbedila raznovrsnost tipova unapređenja u portfoliju, neophodno je da svaki tip projekta mora biti dodeljen bar jednom odeljenju (3). Takođe se zahteva da svako odeljenje implementira makar jedan projekat, čime se osigurava uključivanje svih delova organizacije u procese unapređivanja, što se obezbeđuje ograničenjem (4). Obavezni projekti, identifikovani kao strateški važni, moraju nužno biti uključeni u konačan izbor, što se obezbeđuje uvođenjem ograničenja koje garantuje njihovu selekciju (5). Zbog operativnih i resursnih preklapanja, pojedini projekti se međusobno isključuju, te se osiguranjem (6) osigurava da u takvim parovima može biti izabran najviše jedan projekat. Kako bi se omogućilo binarno odlučivanje (projekat je izabran ili nije) svaka promenljiva u modelu može poprimiti samo vrednosti 0 ili 1, što označava da li je odgovarajući projekat izabran ili ne (7).

2.2. Modeliranje benefita

Svaki projekat se ocenjuje na osnovu kriterijuma specifičnih za njegov tip:

$$b_{ij} = \sum\nolimits_{k\in P_i} w_k \cdot s_{ijk} \tag{8}$$

gde su:
P_i – *skup kriterijuma relevantnih za tip projekata i,*
w_k – *težina kriterijuma k za tip projekta i*
s_{ijk} – *ocena projekta i u odeljenju j prema kriterijumu k*

Projekti kontinualnog unapređivanja nisu nužno iste prirode i ciljevi im mogu biti veoma različiti. Na primer, projekat usmeren na smanjenje troškova ili povećanje produktivnosti ima drugačiju logiku, metriku uspeha i način vrednovanja u odnosu na projekat čiji je cilj poboljšanje bezbednosti na radu ili smanjenje količine otpada. Zbog ovih razlika, kriterijumi za ocenjivanje projekata ne mogu biti uniformno primenjeni na sve tipove projekata na isti način. Projekti imaju različite prioritete, rizike i očekivane koristi, pa se i njihova vrednost mora sagledavati u odgovarajućem kontekstu.

Zato je neophodno razviti univerzalnu skalu ocenjivanja tj. skup standardnih kriterijuma koji će se primenjivati na sve projekte. Međutim, kako bi se obezbedila pravičnost i relevantnost ocene, za svaki konkretan projekat se ocene po tim kriterijumima moraju ponderisati, odnosno prilagoditi značaju koji svaki kriterijum ima u kontekstu tog specifičnog projekta. Na taj način omogućava se uporedivost projekata, ali i preciznije i pravednije odlučivanje pri izboru i prioritizaciji.

Svaka organizacija treba sama da definiše relevantne kriterijume a potom i njihove težine primenom AHP metode, na osnovu svojih prioriteta i strategije. Skale za ocenjivanje kriterijuma treba formirati na osnovu logike koju primenjuju donosioci odluka, kako bi se ocene temeljile na realnim, istorijskim podacima i osigurala objektivnost u vrednovanju projekata.

DRAFT VERZIJA

3. REZULTATI

Da bi se demonstrirala primenljivost predloženog modela, razvijena je studija slučaja koja obuhvata logističku, špediterskу, kompaniju sastavljenu od pet odeljenja u kojoj je prepoznato osam tipova projekata kontinualnog unapređenja. Iako je slučaj ilustrativnog karaktera, i koristi kao simulacija za potrebe validacije modela, on odražava realnu organizacionu strukturu i raznovrsnost projekata tipičnu za preduzeća iz logističke industrije.

Studija slučaja je razvijena u saradnji sa pet eksperata iz industrije sa dugogodišnjim iskustvom u realizaciji projekata kontinualnog unapređenja u oblasti logistike. Njihovo iskustvo doprinelo je realističnosti prikazanog primera jer su eksperti učestvovali u definisanju potencijalnih projekata, formiranju evaluacionih kriterijuma, određivanju njihovih težina za različite tipove projekata primenom AHP metode, kao i u kreiranju skale ocena kriterijuma.

3.1. Studija slučaja

Kompanija sastoji se od sledećih odeljenja: Skladištenje, Unutrašnji transport, Međunarodni transport, Carina i Administracija. Svako odeljenje je predložilo potencijalne projekte, koji su svrstani u 8 različitih tipova projekata:

- Povećanje kapaciteta (Kapacitet)
- Poboljšanje efikasnosti (Efikasnost)
- Smanjenje troškova (Troškovi)
- Poboljšanje kvaliteta (Kvalitet)
- Povećanje bezbednosti na radu (Bezbednost)
- Poboljšanje korisničkog iskustva (K. iskustvo)
- Smanjenje otpada (Otpad)
- Smanjenje CO_2 emisija (Emisije)

Ukupno 42 projekata je uključeno u simulaciju. Svaki projekat pripada jednom od navedenih osam tipova i povezan je sa konkretnim odeljenjem.

3.2. Težine kriterijuma i ocenjivanje

Prethodno pomenuti eksperti su se prvo usaglasili oko kriterijuma koje treba posmatrati prilikom analize svakog projekta. Zaključeno je da je neophodno posmatrati: Početnu investiciju (PI), operativne troškove (OT) na godišnjem nivou, Ostvarene prihode, uštede ili izbegnute troškove (PUT), Povrat investicije (ROI), smanjenje otpada u tonama (OTP), smanjenje CO2 emisija u tonama (EM), bezbednost na radu meren brojem predupređenih incidenata (BZR) i kvalitet izražen u ceni lošeg kvaliteta (*cost of poor quality*) koji je izbegnut (KV).

Kako se različiti projekti posmatraju iz različitih perspektiva određene su Težine kriterijuma primenom AHP metode (Tabela 1).

Tabela 1: Težine kriterijuma

Tip projekta	Težine kriterijuma [%]							
	PI	OT	PUT	ROI	OTP	EM	BZR	KV
Bezbednost	8	6	10	8	4	8	46	10
Emisije	4	8	10	8	16	31	14	10
Efikasnost	6	11	22	12	5	9	18	18
Kapaciteti	7	7	19	18	4	8	20	17
K. iskustvo	7	8	18	10	4	8	16	30
Kvalitet	7	7	15	8	8	7	14	34
Otpad	4	7	11	7	26	19	16	10
Troškovi	7	14	26	13	5	6	15	13

Kako bi se utvrdila skala ocenjivanja za svaki izabrani kriterijum, donosiocima odluka su postavljena kontrolisana pitanja u vezi sa vrednovanjem različitih kriterijuma (npr. za troškove: Kojom ocenom bi se

RADNA VERZIJA

ocenili projekat čiji su operativni troškovi 50 €, 1000€, 200 €, 800,000 €), kako bi se prikupila njihova percepcija vrednosti u okviru konteksta projekta. Na osnovu odgovora donosioca odluka, ocene za različite vrednosti su uprosečene i korišćene za izgradnju matematičke funkcije koja aproksimira njihovu percepciju vrednosti. Rezultujuće funkcije su prikazane u Tabeli 2. Ova funkcija omogućava transformaciju bilo koje numeričke vrednosti (npr. uštede, troška ili investicije) u objektivnu, kontinuiranu ocenu, u skladu sa stavovima i iskustvom eksperata.

Tabela 2: Funkcije ocena

	Ocena kriterijuma							
	PI	OT	PUT	ROI	OT	EM	BZR	KV
$F(x)$=	- 0.884ln(x) + 14.401	- 0.956ln(x) + 14.631	0.8553ln(x) - 2.7868	2.2361ln(x) - 2.4667	0.9786ln(x) + 4.398	0.9353ln(x) - 2.6307	1.2446ln(x) + 3.4506	1.4211ln(x) - 7.4993

3.3. Izabrani portfolio

Na osnovu predstavljenih težina i skaliranih ocena, izračunate su vrednosti koristi (b_{ij}) za svaki od 42 predložena projekta. Problem je modelovan u *Microsoft Excel*-u, na osnovu prikazanog matematičkog modela i do rešenja se došlo korišćenjem *Microsoft Excel Solver-a* kroz celobrojno programiranje.

Ključna ograničenja modela uključivala su:

- Budžet od 150.000 evra godišnje;
- Svako odeljenje mora implementirati najmanje jedan projekat;
- Svaki tip projekta mora biti zastupljen najmanje jednom;
- Dva projekta su definisani kao međusobno isključivi (zbog istih resursa koje koriste).

Od ukupno 42 prijavljena projekta, na osnovu modela je selektovano 11 koji maksimizuju ukupan benefit, uz poštovanje svih postavljenih ograničenja. Tabela 3 prikazuje konfiguraciju izabranih projekata po odeljenjima i tipovima projekata. Vrednost „1“ označava da je projekat odgovarajućeg tipa izabran za dato odeljenje.

Tabela 3: Izabrani projekti

Odeljenje:	Tip projekta:							
	Kapacitet	Efikasnost	Troškovi	Kvalitet	Bezbednost	K. iskustvo	Emisije	Otpad
Skladištenje	0	0	1	1	0	0	0	1
Unutrašnji transport	0	0	0	0	0	0	0	1
Internacionalni transport	0	0	0	0	1	1	0	0
Carina	0	0	1	0	0	0	0	0
Prodaja	0	1	0	0	0	0	1	0
Administracija	1	0	0	0	0	0	0	1

Najviše projekata je izabrano za realizaciju u odeljenju Skladištenja, a ukupno bi trebalo realizovati čak tri projekta smanjenja otpada. Ukupan budžet za projekte nije iskorišćen u celosti, i iznosi 136.902 evra. Jedini projekat povećanja kapaciteta bi trebalo realizovati u Administraciji. Do ovakvog izbora je došlo usled niskih troškova realizacije projekta (koji su u ostalim odeljenjima značajno skuplji) i posledičnog velikog povrata investicije. Slična situacija se dogodila i kod projekta povećanja efikasnosti. Kako je jedna od ideja projekata kontinualnog unapređenja korišćenje što manje resursa, zanimljivo je primetiti da ukoliko bi se budžet prepolovio (na 75.000 evra), realizacija projekata pod ovim uslovima ne bi bila moguća. Sa druge strane, ukoliko bi se budžet smanjio na 100.000 evra realizovao bi se jedan manje projekat, a njihova distribucija bi se značajno promenila. Administracija bi realizovala najviše projekata, a samo u prodaji bi se realizovao isti projekat koji je izabran i u prvoj iteraciji.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je kvantitativni model celobrojnog programiranja za prioritizaciju projekata kontinualnog unapređivanja. Model je zasnovan na maksimizaciji ukupnog benefita projekata. Kako bi se

DRAFT VERZIJA

modelovao benefit kreirana je univerzalna skala ocena za relevantne kriterijume i primenjena je AHP metoda za određivanje težina istih kriterijuma. Iako je skala univerzalna, težine kriterijuma se razlikuju od tipa projekta do tipa projekta kako bi se u obzir uzele razlike među tipovima projekata kontinualnog unapređenja.

Model omogućava strukturisano i transparentno odlučivanje prilikom izbora portfolija projekata, uz uvažavanje organizacionih ograničenja i različitih tipova inicijativa. Kroz ilustrativni primer u logistici pokazana je njegova primenljivost u kompleksnim organizacionim strukturama. Krajnji portfolio obuhvata sve odeljenske i kategorijske zahteve, maksimizujući ukupnu korist uz ograničene resurse.

Za razliku od prethodnih pristupa koji tretiraju prioritizaciju KU projekata izolovano ili u uskim kontekstima, ovaj model nudi fleksibilan i skalabilan okvir primenjiv u različitim organizacionim okruženjima. Skale, kriterijume i težine kriterijuma svaka organizacija treba da definiše sama za sebe, što čini model prilagodljivim i pogodnim za bilo koje kompanije koje žele da institucionalizuju lin prakse i integrišu kontinualno unapređenje u sva područja poslovanja. U narednim istraživanjima bi se mogli porediti rezultati dobijeni predloženom metodom i drugim poznatim metodama. Na ovaj način bi se omogućilo prepoznavanje najboljeg modela za rešavanje definisanog problema.

Pored toga, potrebno je prepoznati i ograničenja istraživanja i samog modela. Model je testiran samo na simuliranom primeru logističke kompanije. Uprkos nastojanju da se uz pomoć industrijskih eksperata kreira realna studija slučaja, postoji mogućnost da nije oslikano činjenično stanje u kompanijama ove industrije. Pored toga, model ne uzima u obzir konflikte ili sinergiju između projekata (osim međusobnog isključivanja) dok u praksi, određene inicijative mogu pojačati ili ometati uticaj drugih. Matematički model u ograničenjima nije obuhvatio ljudske resurse koji bi trebalo da realizuju projekte. Upravo u ovim ograničenjima leže dodatni pravci budućih istraživanja. Potrebno je testirati ga na realnoj studiji slučaja i proširiti model tako da zaposleni koji sprovode ili upravljaju projektima budu uključeni.

Uprkos ovim ograničenjima, predloženi model predstavlja osnovu za strukturirano odlučivanje u procesu više kriterijumskog odlučivanja izbora portfolija KU inicijativa. Buduća unapređenja treba da teže ka uključivanju dinamičnih i interaktivnih elemenata, kako bi se bolje odrazila kompleksnost stvarnog organizacionog konteksta.

LITERATURA

Aqlan, F., & Al-Fandi, L. (2018). Prioritizing process improvement initiatives in manufacturing environments. *International Journal of Production Economics*, *196*, 261–268. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.12.004

Brajer-Marczak, R. (2014). Employee engagement in continuous improvement of processes. *Management*, *18*(2), 88–103. https://doi.org/10.2478/manment-2014-0044

Chakravorty, S. S. (2012). Prioritizing Improvement Projects: Benefit & Effort (B&E) Analysis. *Quality Management Journal*, *19*(1), 24–33. https://doi.org/10.1080/10686967.2012.11918525

Kornfeld, B. J., & Kara, S. (2011). Project portfolio selection in continuous improvement. *International Journal of Operations & Production Management*, *31*(10), 1071–1088. https://doi.org/10.1108/01443571111172435

Kral, P., Valjaskova, V., & Janoskova, K. (2019). Quantitative approach to project portfolio management: Proposal for Slovak companies. *Oeconomia Copernicana*, *10*(4), 797–814. https://doi.org/10.24136/oc.2019.036

Salah, S. (2015). A project selection, prioritisation and classification approach for organisations managing continuous improvement (CI). *International Journal of Project Organisation and Management*, *7*(1), 98. https://doi.org/10.1504/IJPOM.2015.068006

Scavarda, L. F., Ceryno, P., Azevedo, T., & Goyannes Gusmão Caiado, R. (2025). A business process management lifecycle framework for continuous improvement towards operational excellence: Lessons learned from a longitudinal study in a Brazilian organisation. *International Journal of Lean Six Sigma*, *16*(2), 296–327. https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2023-0218

Shaygan, A., & Testik, Ö. M. (2019). A fuzzy AHP-based methodology for project prioritization and selection. *Soft Computing*, *23*(4), 1309–1319. https://doi.org/10.1007/s00500-017-2851-9

Yu, P., Yoo, B. Y., & Lee, J. H. (2022). A DEA-based comprehensive benchmarking approach for implementing continuous improvement. *Business Process Management Journal*, *28*(3), 740–764. https://doi.org/10.1108/BPMJ-05-2021-0368

DRAFT VERSION

POUZDANOST I UPRAVLJANJE RIZIKOM

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

ANALIZA SAJBER RIZIKA PORTALA EUPRAVA KORIŠĆENJEM OCTAVE ALLEGRO PRISTUPA

ANALYZING CYBERSECURITY RISKS OF THE SERBIAN EGOVERNMENT PORTAL THROUGH OCTAVE ALLEGRO

ANDRIJANA DŽAMIĆ[1], ISIDORA GAĆEŠA[2], DRAGANA MAKAJIĆ-NIKOLIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, andrijana.dzamic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-6398-4495
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, isidora.gacesa@fon.bg.ac.rs, 0009-0002-0907-7170
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, dragana.makajic-nikolic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-0790-6791

Rezime: *U radu je sprovedena analiza sajber rizika portala eUprava Republike Srbije korišćenjem metodologije OCTAVE Allegro. Kroz četiri faze ove metodologije identifikovani su ključni elementi informacione imovine, pretnje i ranjivosti, kao i njihova verovatnoća i posledice. Poseban akcenat stavljen je na tehničke mere zaštite i njihov uticaj na funkcionisanje kritične infrastrukture i poverenje građana. Analizom je izdvojeno više scenarija rizika, pri čemu su kao najkritičniji identifikovani DoS napadi i prenos podataka bez enkripcije. Na osnovu procene, predložene su konkretne mere smanjenja rizika. Rad ukazuje na potencijal OCTAVE Allegro pristupa kao korisnog alata u unapređenju sajber bezbednosti javnih digitalnih servisa.*

Ključne reči: *Sajber bezbednost, eUprava, Analiza rizika, OCTAVE Allegro.*

Abstract: *This paper presents a cybersecurity risk analysis of the Serbian eGovernment portal using the OCTAVE Allegro methodology. Through four phases, key elements of information assets, threats, and vulnerabilities were identified, along with their likelihood and potential impact. The analysis focused on technical security measures and their influence on the functioning of critical infrastructure and public trust. It also identified several critical risk scenarios, including DoS attacks and unencrypted data transmission. Based on the assessment, specific risk mitigation measures were proposed. The study highlights the potential of the OCTAVE Allegro approach as a valuable tool for improving cybersecurity in public digital services.*

Keywords: *Cybersecurity, eGovernment, Risk Analysis, OCTAVE Allegro.*

1. UVOD

Razvoj informacionih tehnologija i digitalizacija društva doneli su značajne koristi, ali i nove rizike, naročito u domenu sajber bezbednosti. Zavisnost institucija od digitalnih sistema izlaže ih stalnim pretnjama koje mogu ugroziti kritičnu infrastrukturu i zaštitu podataka (ENISA Threat Landscape, 2023). U tom kontekstu, posebno je važno razmatrati rizike najveće digitalne platforme javne uprave Republike Srbije, portala eUprava.

Jedan od ključnih izazova jeste održavanje balansa između dostupnosti usluga i bezbednosti. Efikasna e-usluga zahteva brz odziv i poverenje građana, ali i doslednu primenu mehanizama zaštite (Bada, Sasse & Nurse, 2020). Privatni sektor u tom pogledu brže uvodi savremene digitalne prakse, dok javni sektor često kasni zbog regulatornih procedura, nedostatka stručnjaka i ograničenih resursa, što ga čini posebno ranjivim na napade motivisane političkim ili strateškim ciljevima (Mushi, 2023). Prema *CyberPeace* institutu (2023), broj napada na državne servise u Evropi porastao je za 30% u odnosu na 2022, a najčešće mete su portali koji obrađuju lične podatke građana.

OECD (2021) i Paigude (2024) ukazuju da javni sektor često nema jasne strategije i protokole zaštite, dok problemi poput zastarele infrastrukture i niske svesti zaposlenih dodatno otežavaju reakciju na incidente. Istovremeno, digitalna transformacija i sve šira primena veštačke inteligencije uvode nove rizike, uključujući manipulaciju algoritmima i automatizaciju sajber napada (United Nations E-Government Survey, 2024).

DRAFT VERZIJA

U literaturi se ističu preporuke za unapređenje bezbednosti javne uprave kroz nacionalne okvire, centralizovanu koordinaciju, timove za brzo reagovanje i modernizaciju tehničkih mera poput enkripcije i višefaktorske autentifikacije (Mushtaq & Shah, 2024; Schneider, 2025). OECD (2021) naglašava da sajber bezbednost mora biti stub, a ne dodatna komponenta digitalne transformacije.

Prema ITU izveštaju (2024), Srbija je ocenjena kao uzorna zemlja sa indeksom sajber bezbednosti od 96,82, naročito u oblasti pravnih normi i međunarodne saradnje. Ipak, oblast tehničkih mera ostaje najniže ocenjena i predstavlja prostor za dalja unapređenja. U tom smislu, cilj rada je da primenom OCTAVE Allegro metodologije predloži pristup za procenu sajber rizika portala eUprava i ponudi konkretne tehničke i organizacione preporuke u svrhu smanjenja pretnji.

2. TEHNIČKE MERE U DOMENU PREVENCIJE SAJBER PRETNJI

Tehničke mere u sajber bezbednosti obuhvataju tehnologije, procedure i metode kojima se štite informacioni sistemi od različitih pretnji. Njihova svrha je očuvanje osnovnih principa poverljivosti, integriteta i dostupnosti (CIA trijada), kao i zaštita privatnosti korisnika i njegovih podataka (Shostack, 2020; ENISA Threat Landscape, 2023). Efikasnost mera zavisi od njihove dosledne primene tokom celog životnog ciklusa informacionog sistema, od dizajna, implementacije i održavanja, do evaluacije i prenosa stečenih iskustava u nove prakse.

Spektar mera je širok i uključuje kontrolu pristupa, identifikaciju i autentifikaciju, enkripciju, detekciju zlonamernog softvera, kao i bezbednosno logovanje i reviziju. Kontrola pristupa obezbeđuje da samo ovlašćeni korisnici imaju pristup resursima, koristeći mehanizme poput RBAC-a, VPN-a i IP filtera. Identifikacija i autentifikacija podrazumevaju lozinke, biometriju i višefaktorsku autentifikaciju (MFA), dok enkripcija štiti podatke u prenosu i mirovanju primenom TLS/SSL protokola, kriptografskih ključeva i digitalnih potpisa. Detekcija zlonamernog softvera sprovodi se kroz antivirusne alate, kontinuirano skeniranje i integraciju sa SIEM sistemima, dok logovanje i revizija omogućavaju praćenje aktivnosti, forenzičku analizu i brzu reakciju na incidente.

U skladu sa preporukama NIST-a (2023) i ENISA-e (2023), ove mere čine osnovu za sistemsku zaštitu informacionih resursa, a njihova primena treba da bude integrisana u sve faze rada javnih digitalnih servisa. Time se obezbeđuje otpornost sistema i minimiziraju posledice eventualnih incidenata.

3. PROCES UPRAVLJANJA RIZIKOM

Prema ISO 31000 standardu, upravljanje rizikom obuhvata tri koraka: (1) ***uspostavljanje konteksta***, gde se analiziraju strateški i organizacioni faktori, (2) ***procenu rizika***, kojom se identifikuju i analiziraju rizični događaji i definišu prioriteti i (3) ***tretman rizika***, koji obuhvata mere smanjenja, prenosa, tolerisanja ili uklanjanja rizika (ISO, 2018; Makajić-Nikolić, 2022). Proces je kontinuiran i integrisan u poslovanje, dok se faza procene rizika ponavlja nakon svake značajne promene ili implementacije mera (Björnsdóttir et al., 2022).

Procena rizika ima ključnu ulogu jer omogućava prepoznavanje potencijalnih događaja, procenu verovatnoće i posledica, te određivanje prioriteta delovanja. Realizuje se kroz tri faze: identifikaciju, analizu i evaluaciju rizika (Makajić-Nikolić, 2022). U praksi se koriste različite kvalitativne, kvantitativne i kombinovane metode, a u ovom radu akcenat je na OCTAVE Allegro metodologiji.

3.1. OCTAVE Allegro metodologija

OCTAVE Allegro (*Operationally Critical Threat*, *Asset* and *Vulnerability Evaluation*) predstavlja fleksibilan i jasno strukturiran okvir namenjen kvalitativnoj i kvantitativnoj analizi rizika u sajber bezbednosti. Za razliku od ranijih verzija, OCTAVE i OCTAVE-S, koje su prvenstveno bile namenjene velikim organizacijama sa složenom infrastrukturom i razvijenim sistemima odgovornosti, OCTAVE Allegro je oblikovan tako da bude primenljiv u organizacijama svih veličina, uključujući i one manje koje nemaju napredne bezbednosne strukture.

Metodologija se zasniva na osam koraka grupisanih u četiri faze: (1) definisanje kriterijuma uticaja, (2) profilisanje imovine, (3) identifikacija pretnji kroz realistične scenarije i (4) analiza i izbor mera na osnovu procene verovatnoće i posledica (Caralli et al., 2007; Aryanti et al., 2023). Na taj način kvalitativne procene dobijaju kvantitativni okvir, što omogućava jasniju sliku o pretnjama i prioritetima delovanja.

Prednost OCTAVE Allegro pristupa je i radionički karakter njegove primene. Implementaciju dodatno olakšava postojanje predefinisanih radnih listova i obrazaca, dostupnih već gotovo dve decenije, što ubrzava sprovođenje metodologije čak i u institucijama bez specijalizovanih timova za informacionu bezbednost (Caralli et al., 2007; Zafar et al., 2022).

DRAFT VERSION

4. SAJBER BEZBEDNOST EUPRAVE: OCTAVE ALLEGRO ANALIZA

4.1. Faza 1: Utvrđivanje kriterijuma za merenje rizika

Prva faza primene OCTAVE Allegro metodologije podrazumeva identifikovanje i rangiranje kritičnih područja uticaja (Tabela 2) sajber rizika na nacionalnom nivou Republike Srbije, sa fokusom na tehničke mere i uticaj na vitalne funkcije države, institucija i činilaca javnog poverenja.

Tabela 1: Kritična područja uticaja (utvrđeno prema (ITU,2024))

Prioritet	***Područje uticaja***
1	Funkcionisanje kritične infrastrukture
2	Reputacije države i poverenje javnosti
3	Međunarodna usklađenost i uključenost
4	Finansijski aspekt
5	Održivost i kapacitet odgovora institucija

Najviši prioritet u procesu identifikacije kritičnih područja uticaja dodeljen je funkcionisanju kritične infrastrukture, jer kompromitovanje digitalnih javnih servisa može ugroziti osnovna prava građana i kontinuitet rada institucija. Drugi rang zauzimaju reputacija države i poverenje javnosti, budući da svaki incident, poput curenja podataka ili prekida usluga, direktno narušava kredibilitet javne uprave i međunarodni imidž. Treći prioritet odnosi se na međunarodnu usklađenost i uključenost, jer neusklađenost sa bezbednosnim i tehničkim standardima može ograničiti saradnju i ugroziti digitalni suverenitet. Niže rangirani, ali i dalje značajni faktori su finansijski aspekt i institucionalna održivost, koji se posmatraju kao sekundarni u odnosu na direktne rizike po dostupnost, integritet i poverenje. U svrhu kvalitativne procene kreirana je tabela za svako od područja uticaja, pri čemu Tabela 2 ilustruje jedno od kritičnih područja kao primer daljeg sistematskog razmatranja.

Tabela 2: Funkcionisanje kritične infrastrukture

KRITERIJUM ZA MERENJE RIZIKA - Funkcionisanje kritične infrastrukture			
Područje uticaja	*Nisko*	*Srednje*	*Visoko*
Pristup javnim e-uslugama	Dolazi do kraćih prekida pristupa pojedinim e-servisima, ali građani mogu izvršiti ključne obaveze alternativnim putem.	Višednevni prekidi pristupa eUpravi utiču na registracije, uverenja, poreske obaveze, te tako nastaje institucionalna zagušenost.	Potpuni prekid funkcionisanja sistema eUprave paralizuje administrativni aparat i onemogućava ostvarivanje osnovnih prava građana.
Pravna sigurnost i evidencija	Pojedini podaci su privremeno nedostupni, ali su bezbedno očuvani i lako se obnavljaju.	Dolazi do delimičnog gubitka pristupa bazama ili ažuriranjima, što izaziva greške i kašnjenja u odlučivanju.	Gubitak ili kompromitovanje ključnih elektronskih zapisa narušava pravnu sigurnost i pokreće niz pravnih postupaka.
Institucionalna efikasnost	Smanjena efikasnost u pojedinim službama, ali se osnovne funkcije i dalje obavljaju.	Vidljiv pad u obradi zahteva i upravljanju dokumentima, uz rast frustracije korisnika.	Sistem administracije postaje nefunkcionalan; hitne intervencije se ne mogu sprovesti na vreme.
Upravljanje digitalnim procesima	Manje tehničke smetnje usporavaju obradu zahteva, ali se ne narušava kontinuitet rada.	Poremećaj u integraciji sektorskih sistema dovodi do neusklađenosti u radu i pogrešnih administrativnih radnji.	Potpuni kolaps digitalnog lanca uprave izaziva pravni, logistički i organizacioni haos na nacionalnom nivou.

4.2. Faza 2: Profilisanje imovine

Druga faza primene OCTAVE Allegro metodologije podrazumeva profilisanje imovine kroz tri podfaze:

a) Profilisanje informacione imovine. Identifikuju se i klasifikuju podaci i resursi od ključne vrednosti za eUpravu. Kritičnu imovinu čine: lični podaci građana, prebivalište i biračko pravo, poreski i finansijski podaci, imovinski podaci, podaci o obrazovanju i zaposlenju, lični i porodični status, pristupni podaci i autentifikacija, logovi i istorija aktivnosti, kao i metapodaci i tehnički zapisi. Svi oni zahtevaju visok stepen zaštite od neovlašćenog pristupa i zloupotrebe.

b) Identifikacija internih nosilaca. Uključuje entitete unutar sistema eUprave koji upravljaju i održavaju podatke. To su pre svega serveri baza podataka, aplikacioni serveri i sistem autentifikacije, unutrašnja mrežna infrastruktura (VPN, LAN), sistemi za logovanje i reviziju, rezervni medijumi (*backup*), kao i serveri za integraciju sa drugim institucijama (npr. RGZ, NBS).

DRAFT VERSION

c) Identifikacija eksternih nosilaca. Odnosi se na subjekte van eUprave koji imaju pristup kritičnoj imovini. Tu spadaju eksterni serverski sistemi i baze podataka, internet konekcija i DNS provajderi, eksterni web servisi, kao i sertifikacioni autoriteti koji izdaju digitalne sertifikate i omogućavaju elektronsko potpisivanje (KITEU, n.d.; ZZPL, 2018; Vlada RS, 2023).

4.3. Faza 3: Identifikacija pretnji

Treća faza OCTAVE Allegro metodologije podrazumeva prepoznavanje događaja i okolnosti koje mogu ugroziti informacioni sistem. Analiza je sprovedena kroz dve podfaze: (1) identifikaciju oblasti interesovanja i (2) definisanje scenarija pretnji.

Uzimajući u obzir složenost analiziranog sistema i veliki broj inicijalno identifikovanih oblasti, radi bolje preglednosti i efikasnijeg sprovođenja analize, one su klasifikovane u pet ključnih kategorija (prema ENISA, 2023):

- Pristup i kontrola pristupa - neadekvatna kontrola privilegija, zloupotreba administratorskih naloga, neovlašćen eksterni pristup.
- Autentifikacija i kredencijali - slabe lozinke, nedostatak MFA, krađa eID podataka, loše upravljanje sesijama.
- Zaštita podataka i privatnost - prenos podataka bez enkripcije, kompromitovanje logova, loše čuvanje rezervnih kopija.
- Eksterni napadi i mrežna bezbednost - DoS/DDoS, malver, ranjivi API-ji, presretanje komunikacije, phishing.
- Operativne i ljudske greške - greške zaposlenih, neusaglašene procedure, loše konfiguracije sistema.

Za svaku oblast definišu se scenariji sa potencijalnim posledicama: od modifikacije ili gubitka podataka, preko obelodanjivanja osetljivih informacija, do potpunog prekida rada sistema. U Tabeli 3 prikazan je primer po jedne oblasti interesovanja iz svake kategorije, zajedno sa odgovarajućim scenarijem i uticajem, što omogućava ilustraciju načina na koji se pretnje razrađuju u okviru OCTAVE Allegro metodologije.

Tabela 3: Primer oblasti interesovanja, scenarija i uticaja

Kategorija	*Oblast interesovanja (primer)*	*Scenario*	*Područje uticaja*
Pristup i kontrola pristupa	Neautorizovani pristup podacima	Zaposleni iz jedne institucije pristupa podacima druge putem eUprave bez ograničenja.	Obelodanjivanje podataka
Autentifikacija i kredencijali	Nedostatak MFA	Neovlašćeni akter koristi ukradene kredencijale i pristupa sistemu bez dodatne verifikacije.	Neautentifikovani pristup
Zaštita podataka i privatnost	Prenos podataka bez enkripcije	Podaci se razmenjuju u otvorenom tekstu, što omogućava napadaču da dođe u posed ličnih informacija.	Curenje podataka
Eksterni napadi i mrežna bezbednost	DoS napad	Server je preplavljen zahtevima i portal eUprava postaje nedostupan korisnicima.	Prekid rada
Operativne i ljudske greške	Greška pri unosu podataka	Ovlašćeno lice greškom unosi netačne podatke u sistem, što dovodi do pogrešnih poreskih obaveza.	Modifikacija podataka

4.4. Faza 4: Analiza i utvrđivanje mera

U završnoj fazi OCTAVE Allegro metodologije vrši se kvantitativna procena rizika kroz kombinovanje posledica i verovatnoće nastanka pojedinačnih pretnji. Za svaku pretnju najpre se određuje kumulativna ocena posledica u odnosu na prethodno definisana područja uticaja i njihove prioritete. Time se omogućava jasnija interpretacija ukupnog rizika i preciznije izdvajanje kritičnih oblasti za delovanje (Caralli et al., 2007; Kuzminykh et al., 2021; Zafar, 2022).

Tabela 4: Matrica vrednosti uticaja

Područje uticaja	*Prioritet*	*Nisko (1)*	*Srednje (2)*	*Visoko (3)*
Funkcionisanje kritične infrastrukture	1	1	2	3
Reputacije države i poverenje javnosti	2	2	4	6
Međunarodna usklađenost i uključenost	3	3	6	9
Finansijski aspekt	4	4	8	12
Održivost i kapacitet odgovora institucija	5	5	10	15

Pored matrice posledica, koristi se i skala verovatnoće (niska - 1, srednja - 2, visoka - 3), koja omogućava pojednostavljenu, ali efektivnu procenu rizika. Iako se u izvornim definicijama OCTAVE Allegro

DRAFT VERZIJA

metodologije verovatnoća procenjuje kvalitativno (Caralli et al., 2007), novija literatura predlaže dodeljivanje numeričkih vrednosti, čime se omogućava preciznije poređenje rizika i njihovo rangiranje.

Na osnovu ukupne ocene posledica i verovatnoće, kreirana je matrica relativne procene rizika koja grupiše rizike u tri kategorije: prihvatljive, one koji zahtevaju nadzor i one koji traže hitnu reakciju.

Tabela 5: Matrica relativne procene rizika

MATRICA RELATIVNE PROCENE RIZIKA		
Ukupan rizik	**Kategorija**	**Tip mere (Pristup)**
90 - 135	Visok rizik	Prioritetni rizici za sanaciju - scenariji koji zahtevaju hitnu reakciju.
45 - 89	Srednji rizik	Rizici za nadzor, mogu se odložiti ili tretirati delimično.
0 - 44	Nizak rizik	Rizici koji su prihvatljivi i najčešće se samo nadgledaju.

Na osnovu ove klasifikacije izdvojena su dva najrizičnija scenarija: (1) Prenos podataka između sistema bez prethodne enkripcije i (2) Uskraćivanje usluge pristupa eUprava portalu putem DoS napada. Njihova detaljna procena prikazana je u Tabeli 5.

Tabela 6: Detaljan proces ocenjivanja rizika za dva najrizičnija scenarija

Rizik	***Funkcionisanje kritične infrastrukture***	***Reputacija države i poverenje javnosti***	***Međunarodna usklađenost i uključenost***	***Finansijski aspekt***	***Održivost i kapacitet odgovora institucija***	***Ukupna ocena posledica (Σ)***	***Verovatnoća***	***Ocena rizika (Σ × ver.)***
Prenos podataka između sistema bez prethodne enkripcije	Srednje (2)	Visoko (6)	Srednje (6)	Srednje (8)	Srednje (10)	32	Visoka (3)	**96**
Uskraćivanje usluge pristupa eUprava portalu putem DoS napada	Visoko (3)	Srednje (4)	Nisko (3)	Srednje (8)	Visoko (15)	33	Visoka (3)	**99**

U završnom koraku OCTAVE Allegro metodologije biće dat predlog konkretnih mera sanacije (Tabela 7), u cilju smanjenja verovatnoće njihovog nastanka i uticaja posledice.

Tabela 7: Mere za smanjenje rizika

Rizik	***Tip mere***	***Nosilac***	***Mera***
Prenos podataka između sistema bez prethodne enkripcije.	Otklanjanje (prioritetna sanacija) (potencijalno otklanjanje)	Unutrašnja mrežna infrastruktura (VPN, LAN)	Sva komunikacija između sistema umreženih institucija mora biti šifrovana korišćenjem protokola koji sprečavaju presretanje i manipulaciju podacima.
		Internet konekcija i eksterni DNS serveri	Upotreba posebnih bezbednosnih protokola (npr. DoH) za prevođenje internet adresa (izvršavanje DNS upita).
Uskraćivanje usluge pristupa eUprava portalu putem DoS napada.	Otklanjanje (prioritetna sanacija)	Serveri baza podataka	Ograničeni broj upita i keširanje podataka koji su često predmet istih.
		Internet konekcija i eksterni DNS serveri	Uvođenje CDN zaštite praćeno ograničavanje broja zahteva koje jedan korisnik može da uputi sistemu u određenom vremenskom periodu (rate-limiting).

5. ZAKLJUČAK

U radu je primenjena OCTAVE Allegro metodologija kao okvir za sistematsku identifikaciju, analizu i procenu sajber rizika portala eUprava. Najkritičniji identifikovani događaj bio je DoS napad, što je poslužilo kao osnova za definisanje odgovarajućih tehničkih mera zaštite. Analiza je pokazala da OCTAVE Allegro pruža jasnu osnovu za rangiranje pretnji i donošenje odluka radi očuvanja funkcionalnosti i poverenja u digitalne servise javne uprave. Budući pravci istraživanja obuhvataju proširenje primene metodologije na druge servise javne infrastrukture, uključivanje većeg broja eksperata za reprezentativniju procenu rizika, kao i dugoročno praćenje efekata mera radi evaluacije njihove efikasnosti i pravovremenog prilagođavanja strategija zaštite.

LITERATURA

Aryanti, U., Anwar, M. T., & Rahmawati, T. (2023). Information security risk management using OCTAVE Allegro method at university. International Journal of Ethno-Sciences and Education Research, 3(4), 137–145. http://dx.doi.org/10.46336/ijeer.v3i4.506

Awad, A. I., Shokry, M., Khalaf, A. A. M., & Abd-Ellah, M. K. (2023). Assessment of potential security risks in advanced metering infrastructure using the OCTAVE Allegro approach. Computers and Electrical Engineering, 108, 108667.

Bada, M., Sasse, A. M., & Nurse, J. R. (2020). Cyber security awareness campaigns: Why do they fail to change behaviour? arXiv. https://arxiv.org/abs/1901.02672

Caralli, R. A., Stevens, J. F., Young, L. R., & Wilson, W. R. (2007). Introducing OCTAVE Allegro: Improving the information security risk assessment process. Hanscom AFB, MA. https://doi.org/10.1184/R1/6574790.v1

CyberPeace Institute. (2023). Annual report on targeted cyber attacks against European public digital services.

European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). (2023). ENISA threat landscape 2023. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108667

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018—Risk management—Guidelines*. ISO. https://www.iso.org/standard/65694.html

International Telecommunication Union (ITU). (2024). Global Cybersecurity Index 2024 (5th ed.).

Kancelarija za informacione tehnologije i elektronsku upravu (KITEU). (n.d.). Portal eUprava Republike Srbije. https://euprava.gov.rs

Keating, C. G. (2024). Validating the OCTAVE Allegro information systems risk assessment methodology: A case study (Master's thesis). Nova Southeastern University.

Kuzminykh, I., Ghita, B. V., Sokolov, V., & Bakhshi, T. (2021). Information security risk assessment. Encyclopedia, 1(3), 602–617. https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030050

Makajić-Nikolić, D. D. (2022). Metode i tehnike za procenu rizika. Fakultet organizacionih nauka.

Mushi, J. (2023). Examining the factors obstructing cyber security readiness in public sector (Doctoral dissertation, IAA).

Mushtaq, S., & Shah, M. (2024). Critical factors and practices in mitigating cybercrimes within e-government services: A rapid review on optimising public service management. Information, 15, 619. https://doi.org/10.3390/info15100619

National Institute of Standards and Technology (NIST). (2023, November 7). Supplemental material: Changes in SP 800-53 Release 5.1.1. In Security and privacy controls for information systems and organizations (NIST Special Publication 800-53 Rev. 5). U.S. Department of Commerce. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-53r5

OECD. (2021). The E-Leaders handbook on the governance of digital government. OECD Digital Government Studies. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/ac7f2531-en

Paigude, S. D. (2024). A review of cybersecurity policies in the public sector: Challenges and solutions. Computer Fraud & Security (November), Article 28. https://doi.org/10.52710/cfs.28

Schneider, G. B. C. (2025). The importance of cybersecurity in digital government implementations. COGNITIONIS, 5(1), Article 585. https://doi.org/10.38087/2595.8801.585

Shostack, A. (2020). Threat modeling: Designing for security (2nd ed.). Wiley.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2024). United Nations e-government survey 2024: Accelerating digital transformation for sustainable development, with the addendum on artificial intelligence. United Nations.

Vlada Republike Srbije. (2023). Program razvoja elektronske uprave u Republici Srbiji za period od 2023. do 2025. godine sa akcionim planom za njegovo sprovođenje („Službeni glasnik RS", br. 33/2023-127).

Zafar, S. (2022). Vulnerability assessment of IoT-based smart lighting systems (Master's thesis, University of Skövde).

Zakon o zaštiti podataka o ličnosti (ZZPL). („Službeni glasnik RS", br. 87/2018). (2018). Pristupljeno 15. juna 2025. sa https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html

DRAFT VERZIJA

PRIMENE OI U ODBRANI

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Pregledni članak

DEFINISANJE PARAMETARA ZA OPTIMIZACIJU RADARSKE MREŽE PRI OTKRIVANJE ROJA DALJINSKI PILOTIRANIH VAZDUHOPLOVA

DEFINING THE PARAMETERS FOR THE OPTIMIZATION OF THE RADAR NETWORK FOR THE DETECTION OF A SWARM OF REMOTELY PILOTED AIRCRAFT

ĐORĐE ĐUKIĆ [1]

[1] Univerzitet u Beogradu, Vojna Akademija, Beograd, djordje.djukic78@gmail.com, 0000-0002-9572-9405

Rezime: *U radu je obrađeno definisanje parametara za optimizaciju radarske mreže radi pravovremenog i preciznog otkrivanja pretnji povrede vazdušnog prostora od strane grupa daljinski pilotiranih vazduhoplova (u daljem tekstu DPV). U prvom poglavlju biće definisana sredstva, resursi i njihove karakteristike, koje utiču na mogućnosti pri formiranju radarskih mreža, kao i osnovni tipovi radarskih mreža. Mogući načini modeliranja roja DPV-a, kao i vrste simulacija njihovih putanja, prikazane su u drugom poglavlju. U trećem poglavlju definisaćemo radarsku pokrivenost prostora, te simulacije prolaska roja kroz pokrivenost i vrste moguće detekcije pri tom prolasku. Nakon svega, ponudićemo optimizacione algoritame koji bi pomogli pri donošenju odluke za izbor najboljih pozicija radara radi ostvarenja ciljane funkcije, odnosno zahteva koji bi mogli biti zadovoljeni ovim algoritmima.*

Ključne reči: *Radarska mreža, roj DPV, radarska pokrivenost, optimizacija.*

Abstract: *This paper discusses the definition of parameters for the optimization of the radar network, with the aim of timely and accurate detection of airspace violation threats by groups of remotely piloted aircraft (hereinafter referred to as DPV). In the first chapter, means, resources and their characteristics will be defined - which affect the possibilities for forming radar networks, as well as the basic types of radar networks. Possible ways of modeling a swarm of DPVs and types of simulations of their trajectories, will be presented in the second chapter. In the third chapter - the radar coverage of the space will be defined, together with the simulation of the passage of the swarm through that space coverage, and the types of their possible detection during that passage. After a comprehensive analysis, this paper will propose optimization algorithms that can help in making a decision for choosing the best radar positions to achieve the target function, i.e. define the requirements that could be satisfied by these algorithms.*

1. UVOD

Parametri radara i radarskih mreža, kao senzora za otkrivanje, praćenje i kontrolu situacije u vazdušnom prostoru, ogledaju se u njihovim prostornim, vremenskim i informacionim mogućnostima. Detekcija roja DPV-a, kao specifičnog načina i taktike njihove upotrebe donosi dodatne izazove u odnosu na detekciju pojedinačnih DPV-a, jer rojevi mogu menjati formaciju, leteti različitim brzinama i visinama te delovati s ciljem zasićenja radarskih sredstava. Optimizacija radarske mreže u tom slučaju zahteva poseban pristup, pri čemu od pomoći može biti vizuelni prikaz radarske pokrivenosti željenog prostora, simulacija prolaska roja kroz taj prostor i definisanje pravila detekcije roja DPV. Cilj rada je definisanje parametara za razvijanje alata koji će nam na najoptimalniji način definisati raspored radarskih sredstava u okviru radarske mreže za pravovremeno i učinkovito otkrivanje roja DPV-a na određenom području, uz minimalne resurse i maksimalnu pokrivenost, u što kraćem vremenu.

PRAĆENJE VERZIJA

2. MOGUĆNOSTI RADARA I RADARSKE MREŽE

Jedan od ulaznih atributa u definisanju parametara za razvoja alata optimizacije u ovom slučaju, jesu borbene mogućnosti sredstava za osmatranje vazdušnog prostora. Pojam borbene mogućnosti odnosi se na ukupnu sposobnost nekog sistema (vojnika, jedinice, sistema ili države) da efikasno vodi borbena dejstva u određenim uslovima. To je širok termin koji obuhvata niz faktora koji zajedno određuju koliko neka sila može da bude uspešna u borbi. Glavni činioci, koji definišu borbene mogućnosti sistema za osmatranje, rano otkrivanje i kontrolu vazdušnog prostora, definišu se kroz mogućnosti osmatranja, otkrivanja, obrade i prosleđivanja podataka o situaciji u vazdušnom prostoru (Mirković, Timotijević & Kepčija, 2016).

Slika 1: Radarska mreža – grafički prikaz

Osmatranje i kontrola vazdušnog prostora, bilo da se radi o pojedinačnim uređajima isturenim za osmatranje po određenim azimutima, dometima i visinama ili se radi o mrežama sredstava organizovanih da zadovolje potrebe pokrivenosti osmatranja vazdušnog prostora za specifične potrebe, zavise od borbenih mogućnosti osnovnih sredstava osmatranja. Osnovni parametri borbenih mogućnosti ovakvih sistema jesu prostorne, vremenske i informacione mogućnosti, tj. osmatranje, obrada i prosleđenje podataka situacije u vazduhu korisnicima kojima je ta informacija potrebna radi dalje akcije zaštite vazdušnog prostora, objekata, jedinica vojske, sredstava i stanovništva.

Radarska mreža je zbir više međusobno povezanih radarskih sistema (senzora) raspoređenih na određenom geografskom području, koji zajedno osiguravaju kontinuirano i preklapajuće praćenje vazdušnog prostora radi otkrivanja, praćenja i identifikacije ciljeva. Po karakteristikama, koje želimo postići pri otkrivanju ciljeva u vazduhu u konvencionalnim borbenim dejstvima, postoje linijske, dubinske i kombinovane. Obzirom da otkrivanje DPV-a, specifično rojeva, iziskuje drugačiji način formiranja radarske mreže, za šta nam je potrebna ideja optimizacije uz uvrštavanje što više faktora i atributa, kako senzora, tako i rojeva.

2.1 Prostorne mogućnosti

Prostorne mogućnosti predstavljaju sposobnost snaga i sredstava osmatranja da u delu vazdušnog prostora (u daljem tekstu VaP) vrše neprekidno otkrivanje i praćenje letelica, radi obezbeđenja operacija RV i PVO i obaveštavanja ostalih struktura VS informacijama o situaciji u VaP (Kepčija, Tanasković & Manić, 2016). Prostorne mogućnosti osmatranja definisane su sledećim parametrima radarskog polja:

- maksimalnom daljinom otkrivanja letelica;
- minimalnom visinom otkrivanja;
- maksimalnom visinom otkrivanja;
- verovatnoćom otkrivanja letelica u radarskom polju osmatranja i
- potrebnim brojem jedinica za formiranje radarskog polja osmatranja .

Maksimalna daljina otkrivanja je najveća daljina na kojoj radarsko-računarsko sredstvo može, sa zahtevanom verovatnoćom, detektovati i pratiti cilj u VaP.

ORAT VERZIJA

Minimalna visina otkrivanja je najmanja visina na kojoj je ostvareno neprekidno radarsko polje i naziva se i donja granica radarskog polja.
Maksimalna visina otkrivanja je najveća visina na kojoj je ostvareno neprekidno radarsko polje i naziva se i gornja granica radarskog polja.

Verovatnoća otkrivanja letelica u radarskom polju osmatranja definisana je tehničkim uputstvima za svako RRS. Veličina radarskog polja osmatranja zavisi od:

- operativnog borbenog rasporeda jedinica,
- taktičko - tehničkih karakteristika RRS,
- izbora radarskog položaja i
- karakteristika refleksne površine letelica za napad iz VaP.

Potreban broj osmatračkih jedinica za formiraljnje neprekidne zone radarskog osmatranja određuje se na osnovu veličine zone, organizacije radarskog prekrivanja, reljefa zemljišta i prosečne daljine otkrivanja radara.

2.2 Vremenske mogućnosti

Vremenske mogućnosti predstavljaju sposobnost da se za određeno vreme izvrši predviđena aktivnosti pri osmatranju, otkrivanju, praćenju, prikupljanju, obradi, prikazivanju i distribuciji podataka radarskog osmatranja, kao i pri navođenju borbene avijacije u lovačkoj nameni (Drakul, Tošić & Đoković, 2016). Način rada pri osmatranju, otkrivanju, praćenju, prikupljanju, obradi, prikazivanju i distribuciji podataka radarskog osmatranja može biti: klasičan, poluautomatizovan i automatizovan. Izabrani način rada direktno zavisi od mogućnosti sredstava, kao i kapaciteta telekomunikacionih sistema za prenos podataka i informacija jedinica.

Pri *klasičnom načinu rada* visina, brzina i kurs cilja se očitavaju i predaju glasom.
Vreme potrebno za predaju podatka o cilju u pri klasičnom načinu rada iznosi maksimalno 20 sekundi po cilju, a prosečno vreme za prikazivanje i obradu podataka u iznosi 15 do 30 sekundi.
Ukupno vreme od momenta radarskog otkrivanja do momenta prikazivanja cilja u brigadnom centru VOJIN, sa odlično osposobljenim radarskim operatorima iznosi 70 do 120 sekundi**.**

Pri *poluautomatizovanom načinu rada* predaja podataka se vrši glasom (iz osnovnih jedinica, od vizuelnih osmatračkih stanica i sl.), a tako primljeni podaci se unose u sisteme automatizacije ručnim započinjanjem, tako što operator za obradu podataka u određenim manipulacijama unosi primljene podatke, a dalja distribucija podataka se odvija automatizovanim putem.

Pri *automatizovanom načinu rada* vrši se automatsko izdvajanje podataka kada se pozicija cilja automatski prenosi u hardversko – softverske sisteme gde se vrši prikupljanje, obrada, prikazivanje i dalja distribucija podataka.

2.3 Informacione mogućnosti

Informacione mogućnosti predstavljaju sposobnost da u zoni operacije pravovremeno obezbedi potrebnu količinu informacija o situaciji u VaP korisnicima u sistemu odrane (Mladenović, Krbavac & Iskić, 2016). Informacione mogućnosti se ogledaju kroz kapacitet javljanja podataka, broj jednovremeno primljenih, obrađenih i praćenih ciljeva kao i distribuiranih informacija za sve korisnike. Informacione mogućnosti su usko povezane sa prostornim, a direktno proističu iz vremenskih mogućnosti. Kao i vremenske, informacione mogućnosti zavise od toga da li je operativni rad organizovan klasično ili automatizovano.

Informacione mogućnosti se iskazuju kroz kapacitet osmatranja i javljanja i kapacitet obaveštavanja korisnika o situaciji u VaP. Kapacitet osmatranja i javljanja je sposobnost da sa određenim brojem osnovnih jedinica obezbedi maksimalan broj javljanja podataka o otkrivenim letelicama u zoni operacije. Predaja podataka može biti klasičnim i automatizovanim putem, pri čemu je osnovni način predaje podataka automatizovanim putem.

DRAFT VERZIJA

3. ROJ DALJINSKI PILOTIRANIH VAZDUHOPLOVA

Tehničke karakteristike roja DPV zavise od vrste i namene, a fokus je na kolektivnom ponašanju, autonomiji i koordinaciji za zajedničko izvršavanje zadatka. Najvažnije tehničkih karakteristika roja DPV-a, koje moramo uzeti u obzir pri razmatranju mogućnosti za njihovo otkrivanje su:

- Autonomija i veštačka inteligencija
- Komunikacija
- Senzorski sistemi
- Fizičke karakteristike dronova u roju
- Koordinacija i raspored
- Upotreba i scenariji

Slika 2: Roj dronova

3.1 Parametri za modelovanje ponašanja roja

Kako bi smo iskoristili ove tehničke karakteristike pri optimizaciji radarske mreže pri otkrivanju roja daljinski pilotiranih vazduhoplova, potrebno je modelovati rojeve, uzimajući u obzir:

- broj DPV-a u roju,
- brzinu i visinu leta i
- taktiku kretanja u vidu raspršenog, zbijenog ili u talasima.

Nakon razmatranja ovih parametara, potrebno je u obzir uzeti i modelovanje putanja roja, koje bi zavisile od konkretnih situacija na terenu. One bi se ticale definisanja polaznih i krajnjih tačaka putanje, kao i mogućnosti da se roj vodi ciljano ili aproksimativno, tj. svojevoljno po nekoj neodređenoj putanji, bez da znamo karakteristike putanja.

3.2 Simulacija detekcije

Simulacija detekcije roja DPV od strane efiksno postavljene radarske mreže, podrazumevao bi mogućnost vizuelnog prikaza radarske pokrivenosti područja od interesa, simulacije prolaska roja kroz područje i detekciju roja u odnosu na neka pravila, koja bi se definisala kroz zahteve za otkrivanje pretnje.
Za izradu vizuelnog prikaza radarske pokrivenosti, možemo koristiti geografsku kartu s prikazom dometa radara u obliku koncentričnih krugova ili senčenih oblasti koje pokazuju efikasan domet i pokrivenost svakog radarskog sistema. Kao ulazni parametri morali bi da se koriste podaci o lokaciji radara, dometu svakog radara, vrsti terena, a prikaz bi mogao biti interaktivan (npr. za korišćenje na webu) ili samo statična slika (npr. PNG ili PDF).

Simulacija prolaska roja DPV kroz dijagram zračenja bi se mogla prikazati pomoću nekoliko softvera, kao recimo QGIS, za precizno mapiranje i analizu prostornih podataka, Inkscape za kreiranje i uređivanje vektorskih grafika ili Google Earth za vizualizaciju i analizu terena.

Pravila detekcije bi mogla biti opciona, u zavisnosti od trenutne taktičko – operativne situacije na konkretnom lokalitetu, a mogla bi se definisati odlukom da barem jedan član roja uđe u domet radara, da određeni postotak roja bude detektovan ili da svi članovi roja budu detektovani. Alat, za kojim bi optimizovali broj i položaj sredstava u radarskoj mreži za otkrivanje roja DPV, trebao bi, u svakom slučaju da zadovolji sledeće ciljeve:

DRAFT VERZIJA

- maksimalno prekrivanje područja
- minimizacija broja potrebnih radara
- detekcija roja u najkraćem mogućem vremenu
- pokrivanje zona od posebnog interesa

4. EVALUACIJA - ZAKLJUČAK

Konačan cilj definisanje parametara za razvoj alata za optimizaciju radarske mreže pri otkrivanju roja daljinski pilotiranih vazduhoplova jeste proračun statistike detekcije, kako po pitanju vremena do prve detekcije, tako i procenta uspešnosti otkrivanja postotka roja unutar tog vremena. Da bi izlazni rezultat bio upotrebljiv, trebao bi sadržati generisan izveštaj sa mapom rasporeda radara u radarskoj mreži, koji zadovoljava ovaj proračun i ispunjava definisane ciljeve.

Rad postavlja teorijsku osnovu za početak generisanja softvera u cilju rešavanja problema, a određeni atributi iz domena postavljanja uvodnih premisa problematike, bili bi podržani poznatim softverom:

- Python: za simulaciju, optimizaciju i evaluaciju,
- NumPy, SciPy, DEAP (za GA), PyGMO (za metaheuristike),
- Folium / Plotly / Matplotlib: za vizualizaciju pokrivanja i putanja roja,
- GeoPandas / Shapely: za rad s geografskim podacima,
- PostGIS: za prostornu bazu podataka,
- React + Leaflet / Mapbox GL JS: za frontend web interfejs.

LITERATURA

Правило бригада ваздушног осматрања јављања и навођења“, *пуковник Мирослав Мирковић, потпуковник Срђан Тимотијевић, потпуковник Јовица Кепчија*, *Београд 2016.*

Правило батаљон ваздушног осматрања јављања и навођења“, *потпуковник Јовица Кепчија, мајор Никола Танасковић, капетан Милан Манић*, *Београд 2016.*

Правило чета ваздушног осматрања јављања и навођења“, *потпуковник Синиша Дракул, Мајор Милорад Тошић, мајор Драган Ђоковић*, *Београд 2016.*

Правило вод ваздушног осматрања јављања и навођења“, *потпуковник Момчило Младеновић Мајор Перица Крбавац капетан Горан Искић, Београд 2016.*

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

UTICAJ PERCEPCIJE MOGUĆNOSTI ALTERNATIVNOG ZAPOŠLJAVANJA NA NAMERU FLUKTUACIJE PROFESIONALNIH VOJNIKA

THE IMPACT OF PERCEIVED ALTERNATIVE EMPLOYMENT OPPORTUNITIES ON THE TURNOVER INTENTION OF PROFESSIONAL SOLDIERS

DEJAN NIKOLIĆ[1], DEJAN STOJKOVIĆ[2], JELENA PETROVIĆ[3]

[1] Garda, Vojska Srbije, Beograd, dejannikolic2909@ gmail.com, 0009-0007-8233-9647
[2] Uprava za strategijsko planiranje, Minisarstvo odbrane, Beograd, dej.stojkovic@gmail.com, 0000-0001-6049-4274
[3] Fakultet za obrazovanje učitelja i vaspitača, Univerzitet u Beogradu, Beograd, jelenailicpetrovic@gmail.com, 0000-0002-5344-5770

Rezime: *Ovaj rad ispituje povezanost između percepcije alternativnih mogućnosti zapošljavanja i namere fluktuacije kod profesionalnih vojnika Vojske Srbije. Istraživanje je sprovedeno na stratifikovanom uzorku od 1187 profesionalnih vojnika u martu 2024. godine, korišćenjem standardizovanog upitnika koji meri nameru fluktuacije, zadovoljstvo poslom i percepciju zapošljivosti. Rezultati pokazuju da profesionalni vojnici generalno iskazuju nisku nameru za napuštanjem Vojske, iako više od 60% njih smatra da bi lako mogli pronaći posao van vojnog sistema. Spearmanova korelaciona analiza ukazuje na statistički značajnu, umereno jaku pozitivnu vezu između namere fluktuacije i percepcije alternativnog zapošljavanja (ro=0,562; p<0,0005), pri čemu percipirana zapošljivost objašnjava oko 32% varijanse u nameri napuštanja službe. Analiza po polu otkriva značajnu razliku u jačini korelacije, koja je izraženija kod muškaraca. Nalazi ukazuju na značaj percipirane zapošljivosti u predikciji fluktuacije i mogu doprineti razvoju efikasnijih politika za zadržavanje kadrova u Vojsci Srbije. Preporučuje se sprovođenje dodatnih istraživanja radi dubljeg razumevanja motiva profesionalnih vojnika i faktora koji utiču na njihovu odluku o ostanku u službi.*

Ključne reči: *Fluktuacija, Percepcija zapošljavanja, Profesionalni vojnici.*

Abstract: *This paper examines the relationship between the perception of alternative employment opportunities and turnover intention among professional soldiers of the Serbian Armed Forces. The research was conducted on a stratified sample of 1,187 professional soldiers in March 2024, using a standardized questionnaire measuring turnover intention, job satisfaction, and perceived employability. The results show that professional soldiers generally express a low intention to leave the military, although more than 60% believe they could easily find a job outside the military system. Spearman's correlation analysis indicates a statistically significant, moderately strong positive relationship between turnover intention and perceived alternative employment ($\rho = 0.562$; $p < 0.0005$), with perceived employability accounting for approximately 32% of the variance in the intention to leave service. Gender-based analysis reveals a significant difference in the strength of the correlation, which is more pronounced among men. The findings highlight the importance of perceived employability in predicting turnover and may contribute to the development of more effective retention policies in the Serbian Armed Forces. Further research is recommended to gain a deeper understanding of the motivations of professional soldiers and the factors influencing their decision to remain in service.*

Keywords: *Employee turnover, Perception of employment, Professional soldiers.*

1. UVOD

Savremeno tržište rada pod uticajem je globalizacije, rasta privatnog sektora, tehnološkog napretka i državnih mera podrške, što otvara brojne prilike za zapošljavanje i promenu karijere. Kada zaposleni primete više prilika van svoje organizacije, raste verovatnoća da će poželeti da je napuste. Ovaj fenomen poznat je kao *percipirana mogućnost zapošljavanja*, a deo je koncepta koji su razvili March i Simon još 1958. godine.

DRAFT VERZIJA

Istraživanja pokazuju da veća uočenost alternativnih opcija korelira sa nezadovoljstvom poslom i većim namerama za odlazak iz organizacije (Dessler, 2013). Stabilno tržište rada pojačava ovu percepciju, dok je u vremenima visoke nezaposlenosti zaposlenima teže da vide druge opcije, što smanjuje fluktuaciju. Ipak, u zemljama sa nestabilnom ekonomijom, odluke o ostanku u poslu često se donose iz ekonomskih, a ne ličnih razloga (Malik, Danish & Munir, 2012).

Spoljni faktori – ekonomska situacija, stopa nezaposlenosti, penzioni sistemi i dostupnost informacija – snažno utiču na ponašanje zaposlenih. Na primer, kada se pojavi bolja ponuda i zaposleni koji nisu planirali odlazak mogu promeniti mišljenje. Modeli fluktuacije, kao što je Stelov, opisuju tri faze: pasivno interesovanje, aktivno traženje i kontaktiranje poslodavaca (Steel, 2002).

Informacije sa tržišta, kao što su broj poziva na razgovore i ponude za posao, mogu ohrabriti ili obeshrabriti zaposlene da napuste svoju organizaciju. Zaposleni koji imaju bolju informisanost češće razmatraju alternativne opcije, a ti su najčešće i najtraženiji na tržištu. Međutim, percepcija mogućnosti zapošljavanja ne znači nužno da će do fluktuacije zaista doći – mnogi zaposleni ostaju neinformisani o tržištu i ne donose odluke isključivo na osnovu ponuda.

Iako se često istražuju unutrašnji faktori poput zadovoljstva poslom, percipirane spoljne mogućnosti zapošljavanja imaju važnu ulogu u oblikovanju namere da se posao napusti. Kada je tržište konkurentno, nezadovoljstvo poslom se lakše pretvara u fluktuaciju. Ipak, deo istraživanja osporava direktan uticaj tržišta na konkretne odluke o napuštanju, iako većina potvrđuje da postoji značajan uticaj na nameru za fluktuacijom.

2. METODE

2. 1. Instrument

Podaci za procenu namere fluktuacije i mogućnosti alternativnog zapošljavanja profesionlanih vojnika prikupljeni su skalama razvijenih od strane Nikolića (Nikolić, 2025).

Upitnik se sastoji od 15 pitanja/tvrdnji. Procena namere fluktuacije se vrši na osnovu 6 tvrdnji, dok se procena zadovoljstva poslom vrši na osnovu 4 tvrdnje. Pet pitanja se odnose na demografske i socioekonomske karakteristike ispitanika.

Sve izjave, osim pitanja vezanih za demografske i socioekonomske karakteristike profesionalnih vojnika koja se popunjavaju zaokruživanjem ponuđenih odgovara te ispunjavanjem praznih mesta, mere se pomoću Likertove petostepene skale stavova.

2.2. Postupak prikupljanja podataka

Podaci korišćeni u ovom radu deo su sprovedenog istraživanja u okviru doktorske disertacije pod naslovom „Uticaj zadovoljstva poslom na fluktuaciju profesionalnih vojnika Vojske Srbije“ koje je sprovedeno u periodu od 1. 3. do 29. 3. 2024. godine.

Anketirani su profesionalni vojnici u okviru 20 jedinica Vojske Srbije koji su se u momentu prikupljanja podataka zatekli na radnom mestu i imali mogućnost da prisustvuju anketiranju (broj lica za anketiranje je bio unapred određen po jedinicama). Anketiranje je vršeno po grupama različite veličine (od 3 do 11 profesionalnih vojnika). Broj ispitanika u grupama, kao i razmak između anketiranja u potpunosti je zavisio od dodeljenih zadataka i raspoloživosti ljudstva.

Za izvođenje statističke analize podataka korišten je programski paket SPSS (verzija 26).

2.3. Uzorak

Istraživanje je obavljeno na stratifikovanom uzorku koji je obuhvatilo 1213 profesionalna vojnika Vojske Srbije oba pola, svih obrazovnih profila i godina života što prema smernicama Evropske federacije psiholoških udruženja (European Federation of Psychologists' Associations – EFPA) predstavlja odličnu veličinu uzorka.

Uzorak nije obuhvatao profesionalne vojnike koji su u radnom odnosu u jedinicama Vojske Srbije kraće od 12 meseci (zaposleni nakon 1. marta 2023. godine), s obzirom na to da se navedeni vremenski period smatra neophodnim za formiranje relativno stabilnih stavova o organizacionoj jedinici i nadređenim strukturama.

Kada se istraživanje vrši popunjavanjem upitnika izuzetno je retko da se dobiju potpuni podaci za svakog ispitanika (Pallant, 2009). Pregledom nedostajućih podataka iz analize su isključeni upitnici od 15 profesionalnih vojnika.

Većina statističkih tehnika osetljiva je na netipične tačke, odnosno na rezultate koji su mnogo iznad, odnosno ispod većine ostalih rezultata (Tabachnick & Fidell, 2013; Pallant, 2009). Analiza u SPSS-u je pokazala da takvih upitnika ima 11. Kako bi rezultati analize bili precizniji indentifikovani upitnici su odbačeni, čime se uzorak smanjio na 1187 profesionalna vojnika.

DRAFT VERZIJA

U konačnom uzorku većina ispitanika bili su muškarci (79,7%, nasuprot 20,3% žena) starosti 45 godina ili mlađi (85,3%) sa srednjom stručnom spremom (87,7 % sa srednjom stručnom spremom trećeg odnosno četvrtog stepena, 1.9% sa završenom osnovnom školom i 10,02 % sa fakultetskim obrazovanjem) koji su ili sami (46,3%) ili u braku/ vanbračnoj zajednici. Približno 55% uzorka je izjavilo da ima do 10 godina radnog staža, 28,1 % da ima od 10 do 20 godina radnog staža, 11,5 % da ima od 20 do 30 godina radnog staža, a 5,3 % ima više od 30 godina radnog staža.

2.4. Pouzdanost i validnost instrumenta istraživanja

Nakon unosa podataka konačnog uzorka (1187 profesionalnih vojnika) izvršena je provera pouzdanosti i validnosti mernih skala instrumenta istraživanja.

Vrednost koeficijenta Kronbah alfa (α) skale za procenu namere fluktuacije (0,920) i skale za procenu mogućnosti alternativnog zapošljavanja (0,848) ukazuju na visoku pouzdanost navedenih skala (Cohen & Swerdlik, 2010).

Dimenzionalnost skala je ispitana eksplorativnom faktorskom analizom. Analizi je prethodilo ocenjivanje prikladnosti podataka za eksplorativnu faktorsku analizu. Vrednost Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) pokazatelja iznosi 0,901 što premašuje preporučenu vrednost 0,8 i pokazuje da je matrica korelacije stavki skale pogodna za sprovođenje faktorizacije (Shrestha, 2021). Takođe visoka vrednost Bartlett testa sveričnosti (χ^2(n=1187) = 8,346.501) uz dostignutu statističku značajnost (p = 0,000) ukazuje na faktorabilnost korelacione matrice. Analiza glavnih komponenata otkrila je prisustvo dve komponente koji objašnjavaju 72,195 % varijanse (Tabela 1).

Tabela 1: Prikaz ukupno objašnjene varijanse eksplorativne faktorske analize

Kom-ponenta	Inicijalna sopstvena vrednost			Ekstrahovana suma kvadratnog punjenja			Rotirana suma kvadratnog punjenja		
	Suma	% vari-janse	kumul. %	Suma	% vari-janse	kumul. %	Suma	% vari-janse	kumul. %
1	5,620	56,198	56,198	5,620	56,198	56,198	5,164	-	-
2	1,600	15,997	72,195	1,600	15,997	72,195	3,780	-	-
3	0,563	5,635	77,830						

3. REZULTATI DESKRIPTIVNE ANALIZE

Za opisivanje distribucije varijabli izvršena je univarijantna analiza. Rezultati univarijantne analize namere fluktuacije prikazana je u Tabeli 2 gde se jasno može uočiti da je uopšteno namera napuštanja Vojske Srbije na nižem nivou.

Tabela 2: Namera fluktuacije

Namera fluktuacije (N=1187)	**Aritmetička sredina**	**Standardna greška aritmetičke sredine**	**Standardna devijacija**
Često razmišljam o tome da dam otkaz.	2,47	0,039	1,341
Aktivno tražim posao van VS.	2,30	0,038	1,301
Prvom prilikom bih naputio svoj sadašnji posao radi slične pozicije sa boljom platom u drugoj organizaciji.	3,03	0,043	1,473
Nameravam da ostanem u VS koliko god mogu.	2,14	0,032	1,114
Nameravam da napustim VS u toku sledeće godine.	2,01	0,031	1,108
Nameravam da napustim VS čim mi istekne ugovor.	1,95	0,031	1,053

Kada je u pitanju percipirana mogućnost alternativnog zapošljavanja van Vojske Srbije, profesionalni vojnici ih uglavnom procenjuju na višim nivoima (Tabela 3). To znači da veruju u mogućnost zapošljavanja u drugim organizacijama. Nešto više od 63% profesionalnih vojnika veruju da bi lako mogli naći drugi posao.

Tabela 3: Namera fluktuacije

Namera fluktuacije (N=1187)	Aritmetička sredina	Standardna greška aritmetičke sredine	Standardna devijacija
Lako bih mogao naći drugi posao.	3,70	0,031	1,073
Lako bih mogao naći bolji posao od ovog koji sada imam.	3,35	0,032	1,101
Znam nekoliko alternativnih poslova za koje bih se mogao prijaviti.	3,45	0,033	1,143
Imam stvarnu ponudu za posao.	2,82	0,039	1,329

4. REZULTATI KORELACIONE ANALIZE

Za ispitivanje jačine i smera linearne veze između varijabli namere fluktuacije i mogućnosti alternativnog zapošljavanja korišćeni su rezultati Spirmanove korelacije.

Pre pristupanja izvršenju korelacione analize izvršena je provera ispunjenosti svih pretpostavki koje nameće ova metoda. Vrednosti Cook's Distance je (0,013) manja od 1 što ukazuje da ne postoje netipične tačke koje mogu negativno uticati na model (Tabachnick & Fidell, 2013).

Izračunata je jaka pozitivna veza između namere fluktuacije i percepcije mogućnosti alternativnog zapošljavanja, r_o=0,562, n=1187, p<0,0005, pri čemu visok nivo percepcije mogućnosti alternativnog zapošljavanja, prati visok nivo namere fluktuacije profesionalnih vojnika.

Na osnovu korigovanog r_o^2 - koeficijenta determinacije (r_o^2=0,315) može se konstatovati da percipirana mogućnost alternativnog zapošljavanja objašnjava gotovo 32 procenta varijanse u odgovorima profesionalnih vojnika na skali namere fluktuacije.

Na prvi pogled vrednosti korelacije u Tabeli 4 upućuju na zaključak da se jačine koeficijenta korelacije između namere fluktuacije i percipirane mogućnosti alternativnog zapošljavanja između profesionalnih vojnika muškog i ženskog pola značajno ne razlikuju.

Tabela 4: Rezultati poređenja koeficijenta korelacije profesionalnih vojnika muškog i ženskog pola

Pol	Varijabla		Namera fluktuacije	Alternativno zapošljavanje
Muški	Namera fluktuacije	Koeficijent korelacije	1,000	**0,565****
		z_1		0,64
		Sig. (2-tailed)		0,000
		N_1	946	946
	Alternativno zapošljavanje	Koeficijent korelacije	0,565**	1,000
		Sig. (2-tailed)	.000	
		N_1	946	946
Ženski	Namera fluktuacije	Koeficijent korelacije	1,000	**0,524****
		z_2		0,583
		Sig. (2-tailed)		0,000
		N_2	241	241
	Alternativno zapošljavanje	Koeficijent korelacije	0,524**	1,000
		Sig. (2-tailed)	0,000	
		N_2	241	241

Da bi se utvrdilo da li je razlika slučajna ili ne potrebno je izvršiti proveru statističke značajnosti razlike između koeficijenta pomoću sledeće jednačine (Pallant, 2009):

$$z_{obs} = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{\frac{1}{N_1-3}+\frac{1}{N_2-3}}} = \frac{0,64-0,583}{\sqrt{\frac{1}{946-3}+\frac{1}{241-3}}} = \frac{0,057}{x\sqrt{\frac{1}{943}+\frac{1}{238}}} = \frac{0,057}{\sqrt{0,001+0,004}} = \frac{0,057}{\sqrt{0,05262}} = \frac{0,057}{0,07254} = 0,78577 \quad (1)$$

Pošto je vrednost z_{obs} veća od 1,96 zaključujemo da su vrednosti koeficijenta korelacije statistički značajno razlikuju, odnosno postoji statistički značajna razlika između namere fluktuacije i percipirane mogućnosti

zapošljavanja između profesionalnih vojnika muškog i ženskog pola. Percipirana mogućnost zapošljavanja objašnjava veći deo varijanse namere fluktuacije profesionalnih vojnika muškog pola nego ženskog pola i ta razlika nije slučajna.

5. DISKUSIJA

Rezultati deskriptivne analize ukazuju na to da je u celokupnom uzorku profesionalnih vojnika Vojske Srbije nivo izražene namere fluktuacije generalno nizak. Najniže prosečne vrednosti ostvarene su za stavove: „Nameravam da napustim VS čim mi istekne ugovor“ (M=1,95) i „Nameravam da napustim VS u toku sledeće godine“ (M=2,01), što sugeriše da većina ispitanika ne planira skoru promenu posla. Nasuprot tome, najviša prosečna vrednost registrovana je za stav „Prvom prilikom bih napustio svoj sadašnji posao radi slične pozicije sa boljom platom u drugoj organizaciji“ (M=3,03), što ukazuje na osetljivost profesionalnih vojnika na mogućnost unapređenja socijalno-ekonomskog statusa putem prelaska u druge organizacije.

U pogledu percepcije alternativnih mogućnosti zapošljavanja, rezultati ukazuju da profesionalni vojnici u značajnoj meri veruju da postoje raspoložive prilike van sistema Vojske Srbije. Najviša prosečna vrednost zabeležena je kod stava „Lako bih mogao naći drugi posao“ (M=3,70), što podržava pretpostavku o njihovoj percepciji tržišta rada kao pristupačnog. Takođe, više od 60% ispitanika navodi da bi lako mogli pronaći posao van Vojske, što potencijalno pojačava fluktuacione namere u slučaju pojave pogodnih prilika.

Rezultati korelacione analize dodatno potvrđuju povezanost između percepcije alternativnih mogućnosti zapošljavanja i izraženosti namere fluktuacije. Spearmanova korelacija pokazuje statistički značajnu, umereno jaku pozitivnu vezu između ove dve promenljive (ro=0,562; p<0,0005). Ova povezanost implicira da profesionalni vojnici koji u većoj meri veruju u mogućnost zaposlenja van Vojske Srbije istovremeno izražavaju i viši nivo namere da napuste trenutno zaposlenje. Dodatno, korekcija za koeficijent determinacije ukazuje da percipirane mogućnosti alternativnog zapošljavanja objašnjavaju oko 32% varijanse u nameri fluktuacije, što je značajan udeo.

Kada se posmatraju razlike po polu, i kod muškaraca (r_o=0,565) i kod žena (r_o=0,524) prisutna je pozitivna i statistički značajna korelacija između ispitivanih varijabli. Međutim, izračunata vrednost z-observacije (z_obs = 0,78577) prema datoj formuli ukazuje na statistički značajnu razliku između ova dva koeficijenta. Ovo znači da je odnos između percepcije alternativnog zapošljavanja i namere fluktuacije izraženiji kod muškaraca, odnosno da profesionalni vojnici muškog pola u većoj meri povezuju mogućnost zaposlenja van Vojske sa namerom da napuste trenutni angažman.

Ovi nalazi su u skladu sa prethodnim istraživanjima koja ukazuju na važnost percipirane zapošljivosti kao faktora u donošenju odluke o napuštanju organizacije (Mitchell et al., 2001; Griffeth et al., 2000). Takođe, mogu imati praktične implikacije za kreiranje politika zadržavanja kadrova unutar Vojske Srbije, naročito u svetlu sve izraženijih izazova u konkurenciji sa civilnim tržištem rada.

6. ZAKLJUČAK

Fluktuacija kadra predstavlja dugotrajan izazov u organizacijama, a razumevanje njenih uzroka ključno je za efikasno upravljanje ljudskim resursima. Ovo istraživanje potvrdilo je postojanje značajne povezanosti između percepcije alternativnih mogućnosti zapošljavanja i namere za napuštanjem službe kod profesionalnih vojnika, što ukazuje da je percipirana mogućnost zaposlenja u drugim organizacijama relevantan faktor u predikciji fluktuacije.

Uprkos validnim rezultatima, istraživanje je imalo određena ograničenja, naročito u pogledu specifičnosti vojnog okruženja, ograničene domaće literature i metodoloških izazova. U cilju dubljeg razumevanja fenomena, preporučuje se sprovođenje dodatnih istraživanja koja bi uključila unapređene instrumente za merenje percepcije alternativnih mogućnosti zapošljavanja i namere fluktuacije, širu analizu uzročnika fluktuacije, kao i ispitivanje ličnih karakteristika i motiva pristupanja vojsci.

Nalazi ovog rada imaju praktičan značaj za sistem upravljanja kadrovima u Vojsci Srbije, jer pružaju uvid u faktore koji utiču na zadržavanje profesionalnog osoblja i mogu poslužiti kao osnova za razvoj ciljanih mera za smanjenje neželjene fluktuacije.

LITERATURA

Cohen, R.J. , & Swerdlik, M. E. (2010). *Psychological testing and assessment: An introduction to test and measurement* (7th ed.). McGreaw-Hill.

Dessler, G. (2013). *Human Resource Management (13th ed.)*. New Jersey: Pearson

DRAFT VERSION

Griffeth, W. R., Hom, W. P., & Gaertner, S. (2000). A Meta-Analysis of Antecedents and Correlates of Employee Turnover: Update, Moderator Tests, and Research Implications for the Next Millennium. *Journal of Management,* 26(3), 463-488. https://doi.org/10.1177/014920630002600305

Malik, M. E., Danish, R. W., & Munir, Y. (2012). The Impact of Pay and Promotion on Job Satisfaction: Evidence from Higher Education Institutes of Pakistan. *American Journal of Economics*, Special Issue, 6-9. https://doi.org/10.5923/j.economics.20120001.02

Mitchell, T. R., Holton, B.C., Lee, T.W., Sablynski, C. J., & Erez, M. (2001). Why people stay: Using job embeddedness to predict voluntary turnover. *Academy of Management Journal*, 44(6), 1102-1121. https://doi.org/10.237/3069391

Nikolić, Ž. D. (2025). *Uticaj zadovoljstva poslom na fluktuaciju profesionalnih vojnika Vojske Srbije*. Doktorska disertacija. Beograd: Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu.

Pallant, J. (2009). *SPSS: Priručnik za preživljavanje* (Prevod trećeg izdanja izd.). Beograd: Mikro knjiga.

Shrestha, N. (2021). Factor Analysis as a Tool for Survey Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistic*, 9(1), 4-11. https://doi.org/10.12691/ajams-9-1-2

Steel, R. P. (2002). Turnover Theory at the Empirical Interface: Problems of Fit and Function. *The Academy of Management Review*, 27(3), 346–360.
http://www.jstor.org/discover/10.2307/4134383?uid=3738296&uid=2&uid=4&sid=21101293632717

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics* (6th ed.). Boston, MA: Pearson.

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

DEFINISANJE VREDNOSTI ROYALTY-A ZA POVERLJIVE PRONALASKE U OBLASTI ODBRANE

DEFINING ROYALTY VALUE FOR CONFIDENTIAL INVENTIONS IN THE FIELD OF DEFENSE

DALIBOR PETROVIĆ[1], JELENA VICANOVIĆ[2]

[1] Univerzitet odbrane, Vojna akademija, Beograd, daliborpetrovic140@gmail.com, 0000-0001-6092-5695
[2] Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, jvicanovic@tmf.bg.ac.rs, 0000-0002-8268-5503

Rezime: *Naknada pronalazaču za poverljivi pronalazak se sastoji od jednokratne novčane naknade za pronalazak koji se primenjuje u Ministarstvu odbrane i Vojsci Srbije i od royalty-a za poverljivi pronalazak koji se ekonomski iskorišćava to jest izvozi. Proračun naknade koja se odnosi na ekonomsko iskorišćavanje poverljivog pronalaska (royalty-a) nije određen. S tim u vezi, cilj rada je da se dođe do adekvatne vrednosti royalitiy-a za poverljive pronalaske. U radu su date polazne osnove za definisanje koeficijenata na osnovu kojih će se vršiti određivanje visine naknade za intelektualnu svojinu zaštićenu poverljivim pronalaskom. Pod pojmom intelektualna svojina u ovom radu će se razmatrati industrijska svojina to jest poverljivi patent. Rad daje model kako odrediti adekvatnu (fer) visinu naknade za ekonomsko iskorišćavanje priznatog poverljivog patenta u odnosu na stepen tehnološke realizacije, inventivnog nivoa i broja sredstava koja se ekonomski iskorišćavaju. Funkcionalnost modela simulirana je na primeru proračuna royalty-a za patent koji se odnosi na deo pešadijskog naružanja.*

Ključne reči: *Royalty, poverljivi pronalazak, patent, tehnološka realizacija, inventivnost.*

Abstract: *The compensation for the inventor of a confidential invention consists of a one-time monetary payment for an invention applied within the Ministry of Defense and the Serbian Armed Forces, and a royalty for the confidential invention that is economically exploited, i.e., exported. The calculation of compensation related to the economic exploitation of the confidential invention (royalty) is not determined. In this regard, the aim of this paper is to establish an appropriate royalty value for confidential inventions. The paper will provide the basic principles for defining coefficients based on which the amount of compensation for intellectual property protected by a confidential invention will be determined. The term "intellectual property" in this paper will refer to industrial property, i.e., a confidential patent. The paper presents a model for determining an appropriate (fair) level of compensation for the economic exploitation of a recognized confidential patent in relation to the degree of technological implementation, the level of inventiveness, and the number of assets that are economically utilized. The functionality of the model is simulated using the example of royalty calculation for a patent related to part of infantry weaponry.*

Keywords: *Royalty, confidential invention, patent, technological implementation, inventiveness.*

1. UVOD

Royalty je vrsta ekonomske naknade koja se isplaćuje autoru ili vlasniku industrijske svojine za proizvodnju i eksploataciju proizvoda koji je predmet intelektualne svojine. Intelektualna svojina može biti zaštićena poverljivim patentom ukoliko se odnosi na naoružanje i vojnu opremu, to jest poverljivi patent je patent koji je od značaja za odbranu i bezbednost zemlje (Uredba, 2023).

Ministarstvo odbrane (MO) vrši procenu da li je patent poverljiv ili ne na osnovu kriterijuma za određivanje pronalaska poverljivim, a to su: tehnološka izvodljivost pronalaska u pogledu daljeg razvoja naoružanja i vojne opreme na osnovu predloženog pronalaska; značajno poboljšanje tehničko-taktičkih karakteristika naoružanja i vojne opreme; ekonomska isplativost pronalaska; doprinos pronalaska razvoju naučnih, tehnoloških, industrijskih i drugih potencijala u unapređivanju operativnih i tehničkih sposobnosti Vojske Srbije (VS) i drugih odbrambenih institucija Republike Srbije i potrebe za opremanjem (Uredba, 2023).

DRAFT VERZIJA

Za poverljivi pronalazak zaštićen patentom ili malim patentom, pronalazač ima pravo na jednokratnu novčanu naknadu, bez obzira na to da li se poverljivi pronalazak primenjuje. Jednokratnu novčanu naknadu pronalazaču isplaćuje MO (Čabarkapa, 2011).

Za zaštićene poverljive pronalaske kojima se opremaju jedinice i ustanove MO i VS, pronalazaču ne pripada deo koji se plaća po osnovu ekonomskog iskorišćavanja (royalty), to jest pronalazaču ne sleduje royalty bez obzira da li se vojska oprema sa jednim ili sa više sredstava zaštićena poverljivim patentom. U slučaju da se pronalazak zaštićen poverljivim patentom ili malim patentom ustupa ili se prodaje licenca, pronalazač ima pravo na deo koji se plaća po osnovu ekonomskog iskorišćavanja (royalty) (Pravilnik, 2023).

Naknada koja se odnosi na ekonomsko iskorišćavanje poverljivog pronalaska (royalty) nije definisana. To jest, ne postoji univerzalni model definisanja visine royalty-a.

U radu će biti predložen model odredjivanja adekvatne (fer) visine naknade za ekonomsko iskorišćavanje priznatog poverljivog patenta.

2. ODREĐIVANJE VISINE ROYALTY-A

Kada je u pitanju određivanje visine royalty-a za patente, treba imati u vidu da se stope royalty-a razlikuju od vrste industrije na koju se patent odnosi i to bez utvrđenog standarda. Stope royalty-a se uglavnom kreću od 0,1 do 25% neto prodaje i zavise od proizvoda i vrste industrije. Obično proizvodi masovne proizvodnje, kao što su hrana i predmeti za domaćinstvo imaju niže vrednosti royalty-a (2-4%), dok proizvodi kao što su nakit ili softver, imaju stopu royalty-a od 6 do 8%. Proizvodi sa jako visokom maržom, kao što je roba dvostruke namene (naoružanje i vojna oprema), mogu dostići i veće vrednosti royalty-a (Pravilnik, 1996).

Faktori koji utiču na visinu royalty-a su:

- Značaj tehnologije na koju se patent odnosi;
- Jedinstvenost patenta;
- Spremnost patenta za proizvodnju;
- Rizik uspeha;
- Potencijalna profitna marža;
- Veličina tržišta;
- Nivo konkurencije;
- Prethodna stopa royalty-a davaoca licence itd.

Što se tiče poverljivih pronalazaka to jest pronalazaka koji su od značaja za odbranu i bezbednost, za faktore koji utiču na visinu royalty-a uzećemo u razmatranje drugi i trći faktor: jedinstvenost patenta i spremnost patenta za proizvodnju. Ostali faktori koji utiču na visinu royalty-a nisu relevantni za poverljive pronalaske iz razloga što ako je za neki pronalazak procenjeno da je poverljiv na osnovu kriterijuma (Uredba, 2023), taj pronalazak će se primenjivati u MO i VS, što znači da će se razvijati i proizvoditi za potrebe opremanja MO i VS. Jedinstvenost patenta je u radu izražena kao koeficijent inventivnosti a spremnost patenta za proizvodnju kao koeficijent tehničke realizacije.

3. METODE ZA PROCENU ROYALTY-A

Visina royalty-a se obično definiše kao procenat bruto ili neto prihoda ostvarenog patentom. Međutim, royalty se može ugovoriti i kao fiksna naknada.

Za definisanje royalty-a za patente, trenutno se koriste sledeće metode: metoda prihoda, metoda tržišta, metoda troškova.

Metoda prihoda procenjuje vrednost intelektualne svojine na očekivanom prihodu koji će patent generisati u budućnosti i na osnovu toga zasniva stopu royalty-a (Salauze, 2011). Najčešći metod zasnovan na prihodu je metod diskontovanog novčanog toka. Međutim, ovi metodi su nezahvalni za određivanje royalty-a za poverljive pronalaske iz razloga što su oni nastali na osnovu potrebe za opremanjem MO i VS, a ne na osnovu potrebe za njihovom komercijalizacijom. Komercijalizacija poverljivih pronalazaka je nusprodukt razvoja patenta za sopstvene potrebe i teško je proceniti da li će se takva roba komercijalizovati (izvoziti) i samim tim na ovaj način odrediti vrednost royalty-a.

Metoda tržišta zasniva stopu royalty-a na royalty-u koji se naplaćuje za uporedive patente na tržištu. Da bi se koristila, moraju se pronaći najnoviji tržišni podaci za uporedive ugovore o licenci, jer funkcioniše tako što otkriva kolika se naknada za royalty plaća za uporedive ugovore o licenci, a zatim koristi ove tržišne podatke kao polaznu tačku za zasnivanje stope royalty-a za patent/licencu koja se prodaje. Što se tiče ove metode, ona nije upotrebljiva za poverljive pronalaske jer su ugovori o prodaji naoružanja i vojne opreme poverljivi i

DRAFT VERZIJA

sklapaju se na državnom nivou, tako da je teško doći do vrednosti royalty-a za slične proizvode i tako definisati royalty za proizvod na koji se odnosi poverljivi pronalazak.

Metoda troškova uključuje izračunavanje troškova proizvodnje sličnog patentiranog sredstva i zasnivanje royalty-a na tome (Sidak, 2016). Da bi se koristila ova metoda, potrebno je da se izračunaju troškovi kupovine ili razvoja sličnih sredstava na koje se poveljivi patent odnosi. Ideja je da intelektualna svojina ne bi trebalo da se vrednuje više od onoga što bi slično sredstvo koštalo da se napravi ili kupi. Pristup troškova je dobra opcija za vrednovanje složenih patenata ili intelektualne svojine koja još nije dokazana na tržištu. Ovaj pristup definisanja royalty-a za poverljive pronalaske bi u nekom modifikovanom obliku mogao da se primeni imajući u vidu da se vrednost sredstva na koje se odnosi poverljivi pronalazak zna jer je isto razvijeno za potrebe MO i VS i nalazi se u upotrebi, tako da se ne mora vršiti procena njegove vrednosti, već se ona tačno zna, što ovu metodu izdvaja od ostale dve.

Metoda definisana u ovom radu predstavlja kombinaciju metode potražnje (u smislu, zna se tačno koliko će sredstava biti prodato na osnovu zaključenog ugovora) i metode troškova sa dodatkom stepena realizacije patenta i njegovog nivoa inventivnosti. Metoda daje sveobuhvatni i egzaktni pristup određivanju royalty-a, jer se prilikom njegovog određivanja zna tačan broj sredstva, cena izrade sredstva, tehnološka realizacija i stepen inventivnosti.

4. METODA ZA ODREĐIVANJE VISINE ROYALTY-A

Kad se govori o royalty-u misli se na visinu naknade za prodaju proizvoda koji je zaštićen patentom, kao na primer kosmodisk, uređaj za izvlačenje vazduha iz načete boce vina, itd. Ovde vidimo da su to sredstva, ili za masovnu proizvodnju, ili manje tehnološki složena sredstva za izradu. Međutim, uglavnom se patenti odnose samo na jedan deo složenog sistema, kao na primer, patent može da se odnosi samo na glavu rotora helikoptera ili na deo lopatice, deo stajnog trapa i slično. Kad se prodaje helikopter u njegovu cenu su uključeni svi sastavni delovi, rezervni delovi, uputstva i slično. Proračun royalty-a u ovom delu nije jasno definisan. Tako da ne bi bilo fer i korektno da nosilac patenta za rotor helikoptera uzima deo royalty-a od ukupne cene prodaje ili dobiti za prodaju helikoptera. Potrebno je u tom slučaju defnisati vrednost royalty-a koji sleduje pronalazaču.

Visina royalty-a se obično definiše kao procenat od ostvarene dobiti ili kao procenat od ostvarenog ukupnog prihoda nastalog prodajom primenjenog pronalaska. Međutim, royalty se može ugovoriti i kao fiksna naknada.

Za obračun royalty-a u modelu prikazanom u radu uzeta je cena izrade jednog dela/sklopa, sredstva na koji se patent odnosi. S tim u vezi, za definisanje royalty-a u modelu će se koristiti koeficijenti inventivnosti i tehničke realizacije, cena proizvoda na koji se odnosi poverljivi pronalazak i broj komada dela/sklopa koji se ekonomski eksploatiše (prodaje).

Koeficijent inventivnosti zavisi od nivoa inventivnosti rešenja prijavljenog pronalaska i određuje ga komisija za suštinsko ispitivanje pronalaska. U proračunu se uzima iz komisijskog izveštaja o suštinskom ispitivanju pronalaska.

I – koeficijent inventivnosti, koji iznosi:

- 0,1 – za mali inventivni nivo;
- 0,2 – za srednji inventivni nivo;
- 0,3 – za visoki inventivni nivo**.**

Imajući u vidu da je u trenutku ekonomske eksploatacije patent u obliku gotovog proizvoda, za proračun royalty-a je relevantan koeficijent tehničke realizacije koji je bio u trenutku kad je autor podneo prijavu, da li je prijava bila sa modelom, prototipom ili sa gotovim proizvodom, pa se na osnovu toga određuje koeficijent tehničke realizacije.

T – koeficijent tehničke realizacije, iznosi:

- 0 – za prijavu pronalaska;
- 0,3 – za prijavu pronalaska sa modelom;
- 0,6 – za prijavu pronalaska sa prototipom;
- 0,9 – za gotov proizvod.

Kako smo ranije napomenuli, prilikom određivanja visine royalty-a za patente, treba imati u vidu da se stope royalty-a razlikuju u zavisnosti od tipa proizvodnje, odnosno od toga da li je reč o masovnoj, serijskoj ili pojedinačnoj proizvodnji. Kako bismo u obračun uključili tip proizvodnje, a istovremeno zadržali jednostavnost funkcije za izračunavanje royalty-a, odlučili smo se za aproksimaciju funkcijom koja prikazuje eksponencijalni rast. Naš cilj je da definišemo funkciju čiji su parametri I i T, pri čemu će vrednosti biti niske za T = 0, a rasti brzo sa povećanjem T. Zbog jednostavnosti, uzmimo $x = I + T$ i tražimo funkciju u obliku:

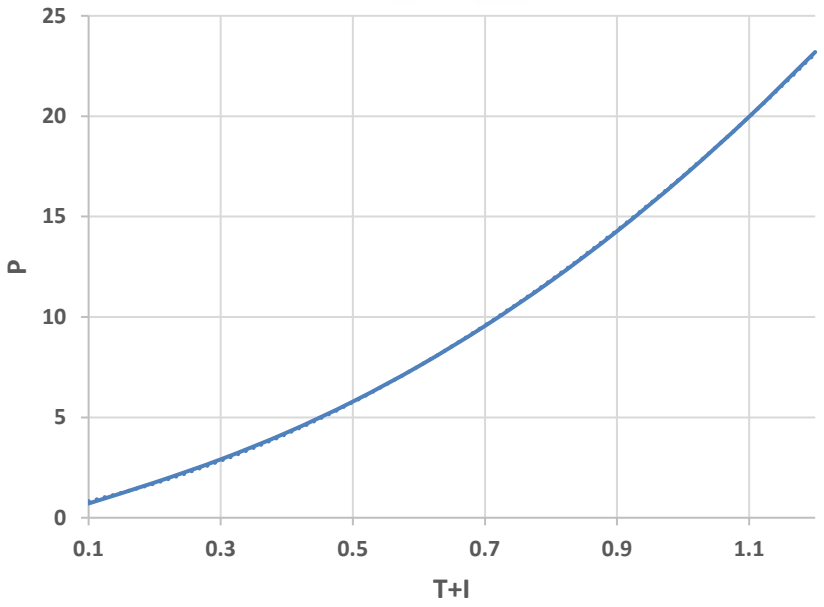
DRAFT VERZIJA

$$f(x) = ax^2 + b\sqrt{x} + c \quad (1)$$

tako da koeficijenti a, b i c budu celi brojevi. Za odabrane vrednosti $a = 13, b = 5, c = -1$ dobijene vrednosti funkcije prikazane su u Tabeli 1.

Tabela 1: Matrica koeficijenata tehničke realizacije sa inventivnim nivom

Tehnička realizacija	Koeficijent tehničke realizacije (T)	Inventivni nivo	Koeficijent inventivnosti (I)	I+T	$f(\mathrm{I}+\mathrm{T})$
Prijava	0	mali	0,1	0,1	0,7111388301
		srednji	0,2	0,2	1,756067977
		visoki	0,3	0,3	2,908612788
Model	0,3	mali	0,1	0,4	4,24227766
		srednji	0,2	0,5	5,785533906
		visoki	0,3	0,6	7,552983346
Prototip	0,6	mali	0,1	0,7	9,553300133
		srednji	0,2	0,8	11,79213595
		visoki	0,3	0,9	14,27341649
Gotov proizvod	0,9	mali	0,1	1	17
		srednji	0,2	1,1	19,97404424
		visoki	0,3	1,2	23,19722558



Slika 1: Funkcija tipa proizvodnje (P) u zavisnosti od koeficijenata tehničke realizacije (T) i koeficijenta inventivnosti (I)

Dakle, vrednost koeficijenta tipa proizvodnje u jednačini za proračun royalty-a biće definisana kao:

$$P = 13(I+T)^2 + 5\sqrt{I+T} - 1 \quad (2)$$

U krajnju vrednost royalty-a uračunavamo i veličine:

C – proizvodna cena dela/sklopa na koji se odnosi poverljivi pronalazak,
K– broj komada dela/sklopa koji se prodaje, preuzet iz ugovora o prodaji sa inostranim partnerom.

Sada krajnju vrednost royalty-a možemo odrediti sledećim izrazom:

$$R = 0{,}01PCK^{0{,}85} \quad (3)$$

5. SIMULACIJA ROJALITIJA ZA POVERLJIVI PATENT

Primer/scenario: MO je zaštitilo poverljivi patent koji se odnosi na deo pešadijskog naružanja. Cena izrade patentiranog dela je 21.000,00 dinara. Pešadijsko naoružanje sa delom na koji se odnosi poverljivi patent se ekonomski iskorišćava to jest izvozi.

Za dati scenario proračunat je royalty, na osnovu izraza (3) za sve koeficijente tehničke realizacije i inventivnog nivoa i to za različit broj komada koji se ekonomski iskorišćava (tip proizvodnje) i prikazan je u Tabeli 2.

Tabela 2: Vrednost royalty-a u odnosu na tehnološku realizaciju, inventivni nivo i broj komada

		K										
T+I	R	1	10	20	30	40	50	100	500	1000	10000	100000
0,1	R[din]	149	1057	1906	2690	3435	4152	7485	29397	52988	375123	2655667
	R[%]	0.71	0,50	0,45	0,43	0,41	0,40	0,36	0,28	0,25	0,18	0,13
0,2	R[din]	369	2611	4706	6642	8482	10254	18482	72591	130846	926319	6557837
	R[%]	1,76	1,24	1,12	1,05	1,01	0,98	0,88	0,69	0,62	0,44	0,31
0,3	R[din]	611	4324	7794	11002	14049	16984	30613	120235	216723	1534282	10861885
	R[%]	2,91	2,06	1,86	1,75	1,67	1,62	1,46	1,15	1,03	0,73	0,52
0,4	R[din]	891	6307	11368	16046	20491	24771	44650	175365	316096	2237785	15842306
	R[%]	4,24	3,00	2,71	2,55	2,44	2,36	2,13	1,67	1,51	1,07	0,75
0,5	R[din]	1215	8601	15504	21883	27946	33782	60892	239159	431085	3051847	21605421
	R[%]	5,79	4,10	3,69	3,47	3,33	3,22	2,90	2,28	2,05	1,45	1,03
0,6	R[din]	1586	11229	20240	28569	36483	44102	79495	312221	562779	3984170	28205761
	R[%]	7,55	5,35	4,82	4,53	4,34	4,20	3,79	2,97	2,68	1,90	1,34
0,7	R[din]	2006	14203	25600	36135	46145	55782	100548	394909	711824	5039329	35675718
	R[%]	9,55	6,76	6,10	5,74	5,49	5,31	4,79	3,76	3,39	2,40	1,70
0,8	R[din]	2476	17531	31600	44603	56959	68855	124111	487457	878642	6220306	44036396
	R[%]	11,79	8,35	7,52	7,08	6,78	6,56	5,91	4,64	4,18	2,96	2,10
0,9	R[din]	2997	21220	38249	53988	68944	83344	150227	590027	1063524	7529172	53302458
	R[%]	14,27	10,10	9,11	8,57	8,21	7,94	7,15	5,62	5,06	3,59	2,54
1	R[din]	3570	25274	45556	64302	82114	99264	178924	702737	1266684	8967435	63484575
	R[%]	17,00	12,04	10,85	10,21	9,78	9,45	8,52	6,69	6,03	4,27	3,02
1,1	R[din]	4195	29695	53526	75551	96480	116630	210225	825676	1488282	10536231	74590806
	R[%]	19,97	14,14	12,74	11,99	11,49	11,11	10,01	7,86	7,09	5,02	3,55
1,2	R[din]	4871	34487	62163	87742	112049	135450	244149	958914	1728444	12236447	86627412
	R[%]	23,20	16,42	14,80	13,93	13,34	12,90	11,63	9,13	8,23	5,83	4,13

Na osnovu dobijenih vrednosti u Tabeli 2 možemo uočiti da se vrednost royalty-a menja u zavisnosti od stepena tehnološke realizacije, što se i očekivalo jer sa većom tehnološkom realizacijom faktor „Rizik uspeha" smanjuje do toga da se kod prijave sa gotovim proizvodom isključuje, pa je samim tim i royalty za gotov proizvod najveći. Što se tiče robe masovne proizvodnje, vrednost royaltiy-a se kreće od 0,13% za prijavu patenta do 4,13% za gotov proizvod, dok se kod pojedinačne proizvodnje sa visokom maržom kreće od 0,71% za prijavu patenta do 23,20% za gotov proizvod. Takođe sa porastom broja proizvedenih komada, vrednost royalty-a pokazuje tendenciju opadanja. Ovo je očekivano, s obzirom na to da povećanje obima proizvodnje

podrazumeva prelazak iz pojedinačne u serijsku, a potom i masovnu proizvodnju, uz istovremeni rast ukupnih troškova proizvodnje.

6. ZAKLJUČAK

U radu je pokazan model proračuna royalty-a za poverljive patente koji se zasniva na koeficijentima: inventivnosti, tehničke realizacije, tipa proizvodnje i broja sredstava na koja se odnosi poverljivi pronalazak a koja se ekonomski iskorišćavaju. Ulazni podaci su cena izrade dela koji je zaštićen patentom, broj komada koji se ekonomski iskorišćava, stepen tehnološke realizacije i inventivnosti. Model daje vrednost royalty-a, kako za pojedinačnu, tako i za serijsku i masovnu proizvodnju, što je postignuto upotrebom vrednosti broja komada u modelu, pa tako imamo najveću vrednost royalty-a (23,2% za jedan komad) za mali broj komada, što ide u prilog činjenici da su naoružanje i vojna oprema sofisticirani i da se uglavnom prodaju u manjem broju komada kao i da predstavljaju robu sa visokom maržom. Kako broj komada u modelu raste i vrednost royalty-a opada, pa na primer sa početnih 23,2% za jedan komad, royalty pada na 4,13% za 100.000 komada, što se poklapa sa royality-jem za robu masovne proizvodnje (kao što je pešadijsko naoružanje, municija i sl.). Sve ovo, ukazuje da razvijeni model u radu ima praktičnog smisla.

Model dat u radu daje dobru osnovu za određivanje royalty-a za poverljive pronalaske, takođe, pruža mogućnost za proširenje i prilagođavanje za proračun royalty-a za patente koji se ekonomski eksploatišu u civilstvu.

LITERATURA

Čabarkapa, O., Dunjić, M., & Petrović, D. (2011). Model institucionalne politike upravljanja intelektualnom svojinom. Vojno delo, 63(4), 251-270.

Pravilnik o postupku ispitivanja poverljive prijave patenta, malog patenta i tehničkih unapređenja značajnih za odbranu i ostvarivanju prava pronalazača"Službeni vojni list", br. 37/2023.

Pravilnik o organizaciji i vrednovanju inventivnog rada u HK „KRUŠIK“ d. d., Interni pravilnik Odelenje za organizaciju HK „KRUŠIK“, 1996, Valjevo.

Sidak, J. G. (2016). Converting Royalty Payment Structures for Patent Licenses. Criterion J. on Innovation, 1, 901.

Salauze, D. (2011). A Simple Method for Calculating a" Fair" Royalty Rate. Nouvelles-Journal of the Licensing Executives Society, 46(3), 210.

Uredba o načinu, postupku i merama zaštite poverljivih pronalazaka značajnih za odbranu,"Službeni glasnik RS", br. 110/2008 i 2/2023.

DRAFT VERZIJA

RUDARSTVO, GEOLOGIJA I ENERGETIKA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Pregledni članak

PRORAČUN EKSPLOATACIONIH REZERVI UGLJA I PRATEĆIH SEDIMENATA PRI PROJEKTOVANJU PODVODNE EKSPLOATACIJE NA RUDNIKU KOVIN

CALCULATION OF EXPLOITABLE RESERVES OF COAL AND ACCOMPANYING SEDIMENTS DURING THE DESIGN OF UNDERWATER EXPLOITATION AT THE KOVIN MINE

BRANKA JOVANOVIĆ[1], SVETLANA POLAVDER[2], SANJA GRUJIČIĆ[3]

[1] Rudarski institut Beograd, povrsinska@ribeograd.ac.rs, 0000-0002-4095-6790
[2] Rudarski institut Beograd, svetlana.polavder@ribeograd.ac.rs, 0000-0002-5661-1578
[3] Rudarski institut Beograd, sanja.grujicic@ribeograd.ac.rs, 0000-0002-1433-9334

Rezime: *Rudarski institut Beograd je angažovan na Rudniku Kovin od samog početka rada rudnika, od inženjeringa na pripremnim radovima i uhodavanju tehnologije podvodne eksploatacije, do projektovanja na svim nivoima (Glavni, Dopunski i Uprošćeni rudarski projekti) i laboratorijskih ispitivanja (geomehanička i ispitivanja kvaliteta uglja). Tema ovog članka jeste metoda proračuna eksploatacionih količina uglja i pratećih sedimenata ležišta Kovin, pri planiranju i projektovanju rudarskih radova na Rudniku Kovin.*

Ključne reči: *podvodna eksploatacija, model, količina, profil.*

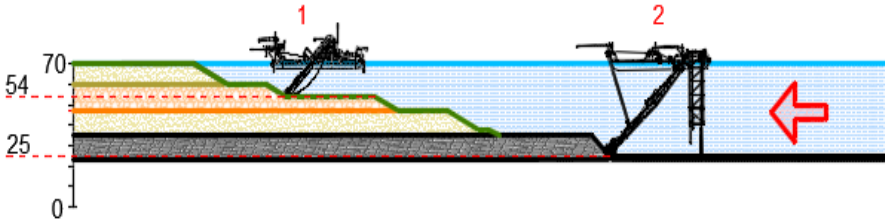
Abstract: *The Belgrade Mining Institute has been involved in the Kovin Mine since the beginning of the mine's operation, from engineering on preparatory works and the introduction of underwater exploitation technology, to design at all levels (Main, Additional and Simplified Mining Projects) and laboratory tests (geomechanical and coal quality tests). The topic of this article is the method of calculating the exploitation quantities of coal and accompanying sediments of the Kovin deposit, during the planning and design of mining works at the Kovin Mine.*

Keywords: *underwater exploitation, model, quantity, profile.*

1. UVOD

Ležište uglja i Rudnik Kovin nalaze se 70 km istočno od Beograda, na levoj obali Dunava, razdvojeni Dunavom od kostolačkog ugljenog basena.

Eksploatacija uglja i pratećih sedimenata (pesak i šljunak) na Rudniku Kovin vrši se metodom podvodne eksploatacije, kao specijalnom metodom površinske eksploatacije. Sedimenti se otkopavaju, kao i pri klasičnoj površinskoj eksploataciji, radom u bloku, u rezovima i podetažama. Klasične etaže ne postoje jer se plovni bageri kreću po površini vode i uvek rade u tzv. dubinskom radu. Etaže su uglavnom granice sedimenata ili vertikalna podela zona rada dva bagera.



1 i 2 – plovni bageri

Slika 1: Podvodna eksploatacija uglja i patećih sedimenata na Rudniku Kovin (Rudarski institut Beograd)

Savremeno planiranje i projektovanje rudarskih radova vrši se na osnovu digitalnog modela ležišta kojeg čini i proračun količina pojedinih sedimenata ležišta mineralnih sirovina u jednoj određenoj konturi.

SAFTVERZIJA

U nastavku teksta prikazani su principi i rezultati modelovanja dela kovinskog ležišta programskim paketom SOL (**S**istem**O**brade**L**ežišta) koji je korišćen u Rudarskom institutu pri izradi rudarskih projekata za Rudnik Kovin .

2. MODELOVANJE LEŽIŠTA UGLJA KOVIN

a) Priprema za modelovanje ležišta

Kao i u svim programskim paketima namenjenim modelovanju ležišta mineralnih sirovina, formira se baza podataka od podloga u obliku ulaznih fajlova (Jovanović i saradnici, 2024):

- rezultata istražnog bušenja (X, Y i Z koordinate, dubina geoloških slojeva i dr.)
- geodetskog snimka terena (X, Y i Z koordinate snimljenih tačaka na terenu) i
- zadate konture eksploatacione zone i godišnjih segmenata (u obliku X, Y i Z koordinata tačaka kontura) unutar kojih se definišu geološki slojevi ugljenog sloja i pratećih sedimenata i proračunavaju eksploatacione količine.

b) Formiranje modela

Nakon učitavanja ulaznih fajlova, filtriranjem i matematičkim operacijama nad podacima, formiraju se (Bratičević, 1990):

- Tačkasti digitalni model (TDM) sa pojedinačnim podacima u svakoj bušotini (koordinate, kote krovine, podine i debljine svakog geološkog sloja) i
- Ekvidistantni digitalni model (EDM) koji se formira interpolacijom pojedinačnih podataka iz bušotine (TDM) na zadatoj mreži podataka sa čvorovima (ΔX, ΔY). Za kovinsko ležište, s obzirom da je sedimentnog tipa sa blago nagnutim slojevima, primenjena je metoda linearne interpolacije.

c) Rezultati modelovanja

Kao konačni rezultati modelovanja, formiraju se izlazni fajlovi u obliku [1]:

- tabela proračuna količina pojedinih sedimenata,
- vertikalnih profila ležišta i
- 2D planova sa izolinijama određenih parametara ležišta (moćnost slojeva, krovine i podine slojeva, koeficijenta otkrivke i sl).

3. PRORAČUN EKSPLOATACIONIH KOLIČINA POJEDINIH SEDIMENATA

Količine pojedinih sedimenata proračunavaju se unutar kontura: određene eksploatacione zone i pojedinačnih godišnjih segmenata u kojima se nalazi projektovana godišnja proizvodnja otkrivke ili uglja.

Pri klasičnoj površinskoj eksploataciji za proračun eksploatacionih količina pojedinih geoloških slojeva primenjuje se standardna metoda proračuna paralelnih vertikalnih profila na određenom rastojanju.

Programski paket SOL koncipiran je na način da proračun eksploatacionih količina pojedinih sedimenata vrši metodom paralelnih horizontalnih profila na rastojanju 1m i na isti način prikazuje rezultate proračuna.

Kao primer, na slikama 2 i 3, kao i u tabeli 1, prikazani su rezultati modelovanja jednog dela kovinskog ležišta, u konturi eksploatacionog polja Rudnika Kovin.

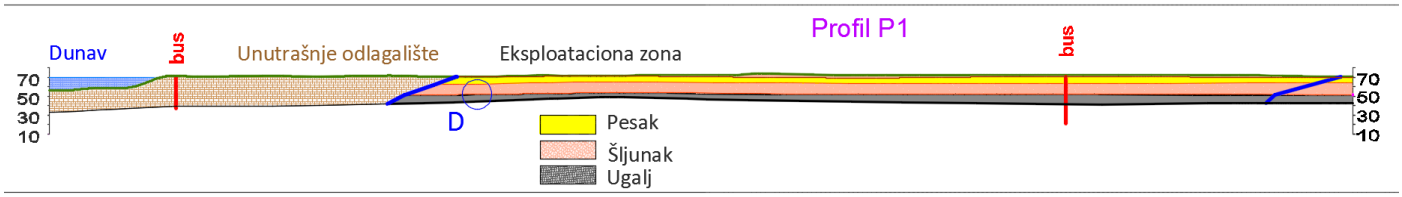
Na slici 3 selektovane su horizontalne površine u ugljenom sloju, na niveletama 52 i 51:

P52 = 46.059 m^2, P51 = 133.359 m^2,

sa zapreminom uglja u pojasu 1m visine

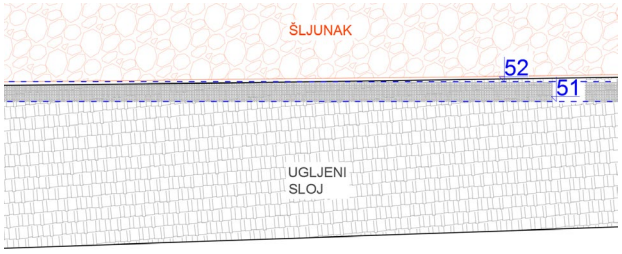
$$V=\frac{P52+P51}{2}\cdot 1m=89.709\ m^3$$

(u tabeli 1 proračuna količina uglja, selektovan red 52-51).



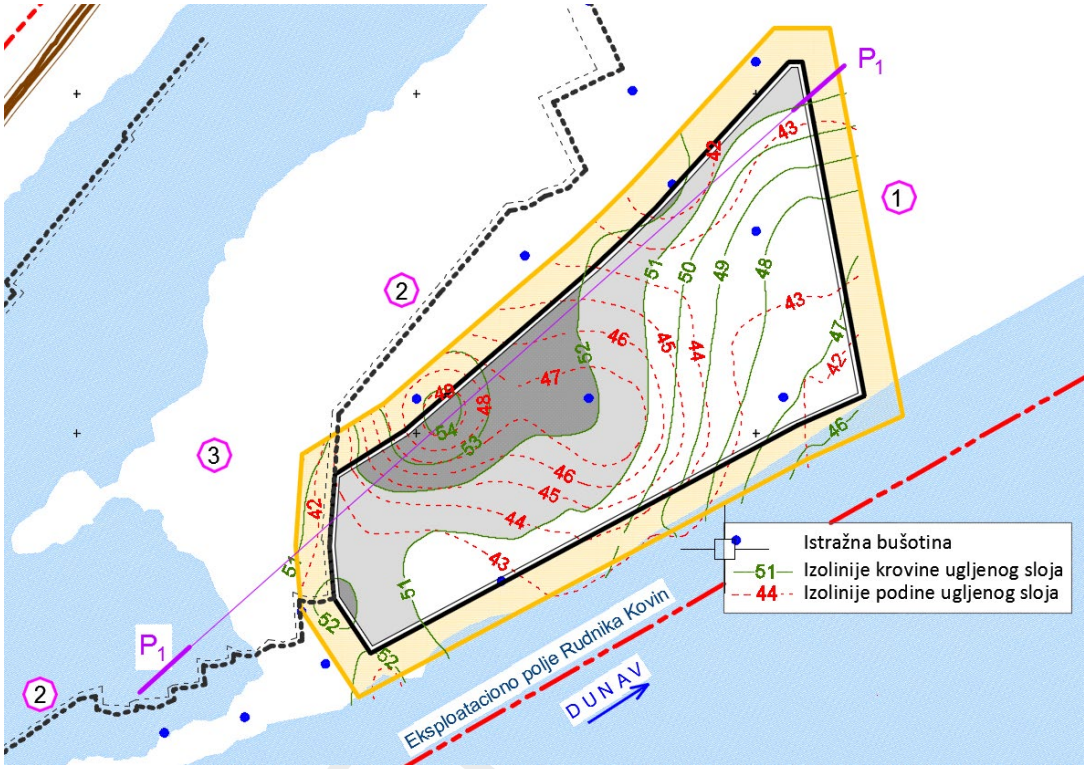
a) profil P1 (položaj na slici 3)

DRAFT VERZIJA



b) detalj D sa profila P1

Slika 2 – Model kovinskog ležišta uglja, profil



Slika 3 – Model kovinskog ležišta uglja, u konturi eksploatacionog polja Rudnika Kovin, osnova sa izolinijama krovine i podine ugljenog sloja
(1-okonturenje nove eksploatacione zone 2-prethodno otkopan ugljeni sloj, 3-unutrašnje odlagalište)

Tabela 1: Model kovinskog ležišta uglja, proračun količina uglja u konturi eksploatacione zone [3]

Niveleta (mnv)		Količina (m^3)			
od	do	u sloju	KUM ↓	KUM ↑	
56	55	0	0	**1.648.868**	
55	54	304	304	1.648.868	
54	53	6.036	6.340	1.648.564	
53	52	19.155	25.495	1.642.528	
52	**51**	89.709	115.204	1.623.373	
51	50	162.669	277.873	1.533.664	
50	49	191.385	469.259	1.370.995	
49	48	213.971	683.230	1.179.609	
48	47	230.684	913.914	965.638	
47	46	222.253	1.136.167	734.954	
46	45	197.162	1.333.329	512.701	
45	44	167.240	1.500.569	315.539	
44	43	112.124	1.612.693	148.299	
43	42	35.145	1.647.838	36.175	
42	41	1.030	1.648.868	1.030	
41	40	0	**1.648.868**	0	**∑M = 1.962.150 t**

DRAFT

4. ZAKLJUČAK

U ovom članku prikazan je princip proračuna količina pojedinih sedimenata dela kovinskog ležišta, u konturi eksploatacionog polja Rudnika Kovin, kao rezultat modelovanja ležišta programskim paketom SOL.

Metoda proračuna količina horizontalnim profilima na rastojanju 1 m pokazala se kao precizna metoda i primenjiva pri projektovanju rudarskih radova u podvodnoj eksploataciji, zbog vertikalne preglednosti količina pojedinih sedimenata za potrebe dubinskog rada plovnih bagera i angažovanja više plovnih bagera sa ograničenim dubinama kopanja.

LITERATURA

Jovanović, B., Polavder, S., & Grujičić, S. (2024, November). Modeling of the Kovin coal deposit in the function of making mining projects. In Proceedings of the III International Symposium Mining and Geology Today. Belgrade. https://doi.org/10.5937/RGD24008J

Bratičević, D. (1990). SOL – Priručnik za korišćenje. Beograd: Rudarski institut.

Rudarski institut Beograd. (1991–2025). Rudarski projekti eksploatacije uglja i pratećih sedimenata na Rudniku Kovin. Beograd: Rudarski institut.

DRAFT VERZIJA

SAOBRAĆAJ, TRANSPORT I KOMUNIKACIJE

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

PRIMENA METODE FUNKCIONALNE ANALIZE REZONANCE NA SUDAR VAZDUHOPLOVA IZNAD ZAGREBA

APPLICATION OF THE FUNCTIONAL RESONANCE ANALYSIS METHOD TO THE MID-AIR COLLISION OVER ZAGREB

NAĐA DRMANIĆ[1], FEĐA NETJASOV[2]

[1] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, n.drmanic@sf.bg.ac.rs, 0009-0000-6233-0409
[2] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, f.netjasov@sf.bg.ac.rs, 0000-0001-8762-8500

Rezime: *U ovom radu prikazan je način na koji modelovanje sudara iznad Zagreba, korišćenjem kvalitativne metode funkcionalne analize rezonance (FRAM), doprinosi boljem razumevanju svih ključnih faktora koji su doveli do ovog događaja. Takođe, sprovedena je i procena rizika od sudara u slučaju da su vazduhoplovi bili opremljeni TCAS sistemom, čime se dodatno ističe značaj savremenih tehnoloških rešenja za unapređenje bezbednosti vazdušnog saobraća.*

Ključne reči: *FRAM, bezbednost vazdušnog saobraćaja, sudar vazduhoplova.*

Abstract: *This study demonstrates how modeling the mid-air collision over Zagreb through the qualitative Functional Resonance Analysis Method (FRAM) contributes to a deeper understanding of the critical factors that led to the incident. Furthermore, a risk assessment was conducted for a hypothetical scenario in which the aircraft were equipped with a Traffic Collision Avoidance System (TCAS), thereby emphasizing the significance of modern technological solutions in enhancing aviation safety.*

Keywords: *FRAM, aviation safety, mid-air collision.*

1. UVOD

Ljudski faktor je, u vazdušnom saobraćaju, oduvek bio usko povezan sa bezbednošću. Danas se bezbednost često meri njenim odsustvom, beleženjem i analizom kritičnih događaja. Bezbednosni izveštaji uglavnom sadrže podatke o broju i ozbiljnosti nesreća u određenom periodu, ali retko daju stvarnu sliku o stanju bezbednosti u sistemu (Perrot et al., 2019).

Osnovni zadatak sistema upravljanja vazdušnim saobraćajem (ATM – Air Traffic Menagement) jeste da omogući bezbedno i efikasno kretanje vazduhoplova tokom svih faza njihovih operacija. Sistem kontrole letenja predstavlja jedan od podsistema ATM-a. Usluge kontrole letenja uglavnom pružaju kontrolori letenja, čiji su glavni zadaci sprečavanje sudara primenom odgovarajućih vertikalnih i horizontalnih normi razdvajanja vazduhoplova, izdavanjem pravovremenih odobrenja i instrukcija koje omogućavaju efikasan protok saobraćaja, prilagođavanjem zahteva posada za promenom željenih nivoa i putanja leta, omogućavanjem neprekidnih operacija penjanja i poniranja, kao i smanjenjem vremena zadržavanja vazduhoplova u vazduhu i na zemlji (Netjasov & Babić, 2020).

Sudari u vazduhu predstavljaju kategoriju vazduhoplovnih nesreća koje, iako retke, imaju katastrofalne posledice i zahtevaju naprednu sistemsku analizu. Razvoj metode funkcionalne analize rezonance (FRAM – *Functional Resonance Analysis Method*) proistekao je iz uočenih ograničenja tradicionalnih determinističkih i probabilističkih pristupa u razumevanju ponašanja složenih sistema i njihove bezbednosti. FRAM metoda analizom radnih procesa i funkcija prikazuje način na koji se posao svakodnevno obavlja a ne zamišljeni ili idealizovani način rada (Hollnagel, 2012). FRAM je metoda za modelovanje složenih socio-tehničkih sistema, stoga, model dobijen FRAM analizom može poslužiti kao osnova za bolje razumevanje složenih bezbednosno-kritičnih sistema poput ATM-a.

DRAFT VERZIJA

2. METODA FUNKCIONALNE ANALIZE REZONANCE

Metoda funkcionalne analize rezonance je grafička metoda koja pruža prikaz odvijanja nekog procesa kroz više različitih funkcija i aktivnosti. Model dobijen primenom FRAM-a predstavlja opis funkcija koje su potrebne kako bi se određena aktivnost izvršila. Opisi funkcija omogućavaju analizu međusobnog uticaja i zavisnosti funkcija koje čine sistem i sagledavanje slučajeva kada potencijalne međuzavisnosti, u određenim okolnostima, mogu postati stvarne (Hollnagel, 2012, 2018).

FRAM se zasniva na 4 osnovna principa (Hollnagel, 2018):

- **Princip ekvivalentnosti uspeha i neuspeha.** FRAM prepoznaje da se stvari odvijaju ispravno i pogrešno na suštinski isti način. Razlika u ishodima ne znači nužno da su i osnovni procesi različiti.
- **Princip približnih prilagođavanja.** Mnogi socio-tehnički sistemi su suviše složeni da bi se mogli potpuno predvideti i kontrolisati. Varijabilnost u radu pojedinaca, timova i organizacija omogućava da sistem funkcioniše kako treba, ali je istovremeno i razlog zbog kojeg ponekad dolazi do problema ili otkaza u sistemu.
- **Princip emergencije.** Varijabilnost koja se javlja u okviru više funkcija može se kombinovati na neočekivane načine, što dovodi do posledica koje su nesrazmerno velike.
- **Princip funkcionalne resonance.** Varijabilnosti različitih funkcija povremeno mogu da proizvedu rezonancu, tj. da se međusobno pojačavaju, čime varijabilnost jedne funkcije može postati neuobičajeno visoka.

Prvi korak u modelovanju nekog sistema korišćenjem FRAM metode je definisanje funkcija koje su neophodne za svakodnevno funkcionisanje sistema i opisivanje ključnih aspekata funkcija koji su neophodni za njihovo izvršenje. Svaka funkcija može biti opisana kroz šest aspekata (Hollnagel, 2012, 2018):

- Ulaz (Input): Stavke koje se obrađuju unutar funkcije.
- Izlaz (Output): Rezultat koji funkcija proizvodi.
- Preduslov (Precondition): Uslovi koji moraju biti ispunjeni pre nego što funkcija počne da se izvršava.
- Resursi (Resources): Stavke koje se troše tokom procesa izvršenja funkcije ili bez kojih funkcija ne može biti izvršena (ali ne nužno i započeta).
- Vreme (Time): Vremensko ograničenje u okviru kojeg funkcija mora da se izvrši.
- Kontrola (Control): Načini na koje se izvršenje funkcije nadgleda i reguliše.

Da bi FRAM model bio potpun, svaki opisani aspekt funkcije mora biti povezan sa nekom drugom funkcijom. Dakle, ako funkcija ima izlaz, taj izlaz mora biti povezan sa drugom funkcijom, bilo kao ulaz, preduslov, resurs, kontrola ili vreme.

Analiza sistema predstavlja drugi deo primene ove metode. Cilj analize je da se okarakteriše i analizira potencijalna varijabilnost svih relevantnih funkcija i njihova međusobna zavisnost, samim tim stvarajući potpuniju sliku o varijabilnosti čitavog sistema (Hollnagel, 2018).

3. PRIMENA FRAM-A NA SUDAR IZNAD ZAGREBA

3.1. Informacije o nesreći

Sudar vazduhoplova BE 476 i JP 550 dogodio se 10. sepembra 1976. godine, iznad Zagreba, u blizini Vrboveca, u 10.14’41’’ po lokalnom vremenu. Let Bealine 476 British Airways-a avionom Trident Three (T-3) prevozio je, redovnom linijom, 54 putnika i 9 članova posade sa aerodroma Heathrow, London ka Istanbulu, dok je let JP 550 Inex Adria-e avionom DC-9 prevozio 108 turista od Splita do Kelna (Accidents Investigation Branch, 1982).

Vazduhoplov Trident Three je poleteo sa aerodroma Heathrow u 08.32 i kontakt sa “gornjim” sektorom kontrole letenja u Zagrebu uspostavio u 10.04’12’’. Nakon toga, više nije stupao u kontakt sa kontrolom letenja. U trenutku sudara, Trident Three je leteo na FL 330, brzinom od 295 Kts.

DC-9 je poleteo sa aerodroma Split u 09.48. Nakon otprilike 18 minuta od poletanja, DC-9 dostiže FL 220 pri kursu 359 i brzini od 316 Kts, i traži odobrenje kontrolora “srednjeg” sektora (*Middle Sector*) za penjanje na veću visinu. Kontrolor saopštava da su FL 310, FL 330 i FL 280 zauzeti i nudi penjanje na FL 350, na šta pilot Inex Adria-e pristaje. U 10.12’03’’ JP 550 javlja prelet FL 310 i dobija instrukciju da pređe na frekvenciju gornjeg sektora. Od poslednje komunikacije sa kontrolorom srednjeg sektora do stupanja JP 550 u komunikaciju sa gornjim sektorom u 10.14’04’’ prošlo je 1 minut i 52 sekunde, zbog zauzetosti radio veze na frekvenciji 134.45 MHz. U 10.14’04’’ pilot JP 550 uspostavlja kontakt sa gornjim sektorom. Ovo je ujedno bila i poslednja komunikacija između JP 550 i kontrole letenja Zagreb.

U trenutku sudara DC-9 se nalazio u horizontalnom letu na FL 330 pri brzini od 261 Kts. U 10.15’06’’ kontrola letenja Zagreb je pokušala da stupi u kontakt sa posadom leta BE 476 kako bi potvrdili prelet

DRAFT VERZIJA

Našica. Posada se nije javila jer se u ovom trenutku sudar JP 550 i BE 476 već dogodio (Accidents Investigation Branch, 1982).

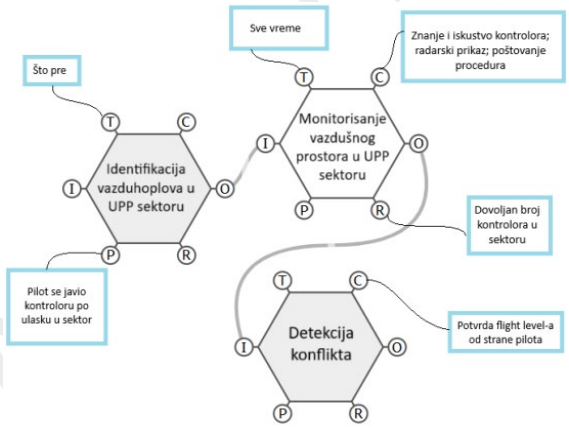
3.2. Definisanje funkcija i analiza FRAM modela udesa

FRAM metoda je do sada već našla primenu u analizi sudara vazduhoplova, gde se pokazala kao korisna metoda za bolje razumevanje veza između funkcija sistema i njihovih varijabilnosti (De Carvalho, 2011). U slučaju udesa iznad Zagreba osnovne funkcije definisane su kao osnovni radni zadaci kontrole letenja u gornjem sektoru (u nastavku „UPP" sektor). Osnovne funkcije i opis njihovih aspekata dati su u Tabeli 1.

Tabela 1: Osnovne funkcije i opisi njihovih aspekata

Funkcija	I	O	P	C	R	T
Identifikacija vazduhoplova u UPP sektoru	Vazduhoplov je ušao u UPP sektor	Vazduhoplov je identifikovan	Pilot se javio kontroloru pri ulasku u sektor	/	/	Što pre (*as soon as posible*)
Monitorisanje vazdušnog prostora u UPP sektoru	Vazduhoplov je identifikovan	Kontrolor monitoriše saobraćaj u UPP sektoru	/	Znanje i iskustvo kontrolora; radarski prikaz; poštovanje procedura	Dovoljan broj kontrolora u sektoru	Sve vreme
Detekcija konflikta	Kontrolor monitoriše saobraćaj u UPP sektoru	Konflikt je detektovan	/	Potvrda flight level-a od strane pilota	/	/

Da bi kontrolor na dužnosti mogao da vrši monitorisanje vazdušnog prostora u svojoj nadležnosti neophodno je da najpre identifikuje vazduhoplov po ulasku u sektor, kako bi pratio parametre leta i kretanje vazduhoplova, a samim tim i imao mogućnost da pravovremeno detektuje moguće konflikte sa drugim vazduhoplovima i reaguje u skladu sa time (Slika 1).



Slika 1: Vizuelni prikaz osnovnih funkcija FRAM modela

U slučaju udesa iznad Zagreba, sam prelazak vazduhoplova iz srednjeg u gornji sektor nije bio adekvatno i jasno koordinisan između kontrolora koji su tog dana bili na dužnosti. Standardna procedura koordinacije prelaska vazduhoplova iz jednog u drugi sektor podrazumeva telefonski razgovor između kontrolora, kako bi komunikacija bila dokumentovana (snimljena), međutim, kako je glavni kontrolor gornjeg sektora tog dana radio sam, bio je zauzet komunikacijom sa vazduhoplovima u vazdušnom prostoru njegove nadležnosti. Iz tog razloga je asistent kontrolor srednjeg sektora (u nastavku „MID" sektor) prišao Tasiću i prstom pokazao na poziciju JP 550 na radaru i zatražio odobrenje za penjanje na FL 350. Po njegovim rečima Tasić je odobrio penjanje JP 550 na FL 350, međutim, kontrolor gornjeg sektora, Gradimir Tasić, tvrdi kako mu je asistent kontrolor srednjeg sektora samo pokazao na neki vazduhoplov u blizini Kostajnice. Takođe, kako je, po planu leta, JP 550 trebao da leti na FL 310 koji je u nadležnosti srednjeg sektora, strip za gornji sektor nije bio unapred pripremljen kao što procedure nalažu. JP 550 je po ulasku u gornji sektor kontrole letenja pokušavao da stupi u kontakt sa kontrolorom Tasićem tokom 1 minuta i 52 sekunde. Preslušavanjem audio snimaka je ustanovljeno da je pilot JP 550 imao priliku da se javi kontroloru gornjeg sektora u nekoj od 4 pauze u komunikaciji sa drugim vazduhoplovima, u ukupnom trajanju od 31 sekund (prva pauza – 5s; druga pauza – 6s; treća pauza – 13s; četvrta pauza – 7s).

RADNA VERZIJA

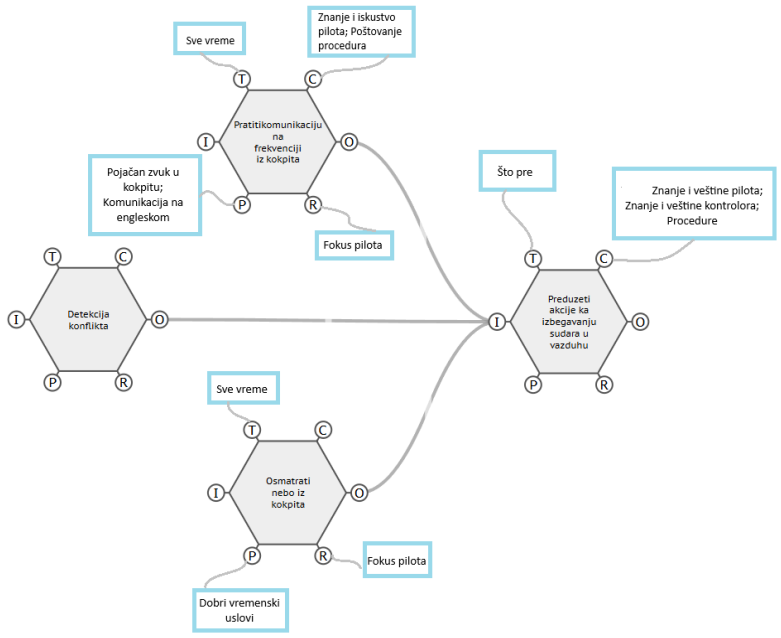
U Tabeli 2 dat je prikaz funkcija koje su neophodne za ispunjenje gore navedenih osnovnih funkcija, a to su: „Kontrola kapaciteta u UPP sektoru kontrole letenja“, „Koordinacija kontrolora MID i UPP sektora“, „Prelazak vazduhoplova iz MID u UPP sektor“ i „Javljanje pilota kontroloru pri ulasku u sektor“.

Tabela 2: Funkcije FRAM modela udesa iznad Zagreba

Funkcija	I	O	P	C	R	T
Kontrola kapaciteta u UPP sektoru kontrole letenja	/	Dovoljan broj kontrolora po sektoru	/	Prijavljivanje kašnjenja/odsutnosti	/	Sve vreme
Koordinacija kontrolora MID i UPP sektora	Zahtev za penjanje na FL350	UPP kontrolor obavešten o vazduhoplovu	Dovoljan broj kontrolora po sektoru	/	/	Što pre
Prelazak vazduhoplova iz MID u UPP sektor	Odobrenje za penjanje na FL350	Vazduhoplov je ušao u UPP sektor	UPP kontrolor obavešten o vazduhoplovu; Formiran strip za UPP sektor	Znanje i iskustvo kontrolora; komunikacija kontrolora i pilota; poštovanje procedura	/	/
Javljanje pilota kontroloru pri ulasku u sektor	Vazduhoplov je ušao u UPP sektor	Pilot se javio kontroloru po ulasku u UPP sektor	Slobodna radio-frekvencija	/	/	Što pre

Prilikom komunikacije kontrolora gornjeg sektora i pilota BE 476 u koju su stupili u 10.04'12", ustanovljeno je da se očitana visina na radaru i usmeno preneta informacija o visini od strane pilota nisu poklapale. Procedura nalaže da u tom slučaju kontrolor mora zatražiti ponovno očitavanje visine, kako bi mogao neometano da vrši funkciju detekcije konflikata. U ovom slučaju, kontrolor je zanemario procedure i oslonio se na podatak dobijen sa radara koji je očitavao FL 332 ili FL 335, dok je pilot tvrdio da leti na FL 330. Neposredno pre udesa, kontrolor gornjeg sektora je verovao da se BE 476 nalazi na FL 335 i to i preneo pilotu JP 550 uz instrukciju da zadrži visinu od tačno 33000 ft.

Letačka posada BE 476 je, prilikom poslednje komunikacije JP 550 sa kontrolorom gornjeg sektora, mogla da čuje na kojoj visini i u kom pravcu JP 550 leti, pre nego što je kontrolor gornjeg sektora prešao na komunikaciju na srpskohrvatskom jeziku, time kršeći proceduru. Takođe analizom i ispitivanjima sudara ustanovljeno je da su oba vazduhoplova mogla da vide jedan drugi u poslednjih 32 sekunde pre udesa. U to vreme na vazduhoplovima nije bio ugrađen TCAS sistem koji bi pilotima dao instrukcije ka izbegavanju udesa. U Tabeli 3 i na Slici 2 dati su opisi aspekata funkcija „Pratiti komunikaciju na frekvenciji iz kokpita“, „Osmatrati nebo iz kokpita“ i „Preduzeti akcije ka izbegavanju sudara u vazduhu“.



Slika 2: Vizuelni prikaz funkcija FRAM modela sudara

Tabela 3: Funkcije FRAM modela sudara i njihovi aspekti

Funkcija	I	O	P	C	R	T
Pratiti komunikaciju na frekvenciji iz kokpita	Vazduhoplov je ušao u UPP sektor	Oslušnuta informacija o postojanju vazduhoplova na istom FL	Pojačan zvuk u kokpitu; Komunikacija na engleskom	Znanje i iskustvo pilota; Poštovanje procedura	Fokus pilota	Sve vreme
Osmatrati nebo iz kokpita	Let je započet	Uočen vazduhoplov na istom FL	Dobri vremenski uslovi	/	Fokus pilota	Sve vreme
Preduzeti akcije ka izbegavanju sudara u vazduhu	Konflikt je detektovan; Oslušnuta informacija o postojanju vazduhoplova na istom FL; Uočen vazduhoplov na istom FL	Konflikt je detektovan	/	Znanje i veštine pilota; Znanje i veštine kontrolora; Procedure	/	Što pre

3.3. Zaključak analize nesreće

Analizom FRAM modela udesa iznad Zagreba ustanovljeno je da je najveću varijabilnost osnovnih funkcija izazvalo nepoštovanje procedura od strane svih uključenih strana, kao i neadekvatna koordinacija između kontrolora letenja srednjeg i gornjeg sektora. Ključni faktor koji je uticao na ishod koordinacije a kasnije i detekcije konflikta jeste preveliko opterećenje kontrolora gornjeg sektora prouzrokovano neadekvatnom kontrolom kapaciteta i opterećenja u oblasnom centru kontrole letenja Zagreb. Mogućnost kontrolora da se prilagode nesvakidašnjim situacijama i da na taj način ispoljavaju varijabilnost, u većini slučajeva predstavlja prednost i ono što ih razdvaja od mašina. Sa druge strane, FRAM nam pokazuje kako upravo ta varijabilnost ponekad može dovesti do neželjenih ili katastrofalnih ishoda.

- Preporuke za ublažavanje varijabilnosti funkcija proistekle iz prethodne analize, jesu:
- Osigurati da u svakom trenutku na random mestu bude potreban broj kontrolora.
- Ravnomerno rasporediti radno opterećenje kontrolora adekvatnim rasporedom smena, otvaranjem novih sektora u skladu sa potražnjom, i dr.
- Redovna provera opreme i radio-navigacionih sredstava.
- Unapređenje procedura na osnovu bezbednosnih analiza sistema.
- Redovne obuke koje će zaposlenima osvežiti pamćenje o procedurama i njihovoj važnosti za bezbedno odvijanje vazdušnog saobraćaja.

3.4. Prediktivna analiza TCAS sistema

U slučaju sudara iznad Zagreba, postojanje TCAS sistema je moglo da spreči sudar dva vazduhoplova, iz tog razloga značajno je uraditi procenu rizika u slučaju da su vazduhoplovi JP 550 i BE 476 bili opremljeni TCAS-om. U slučaju sudara iznad Zagreba, TCAS bi izdao TA (Traffic Advisory) upozorenje između 48 i 35 sekundi pre sudara. Tokom tog vremena postojala je mogućnost da posade vazduhoplova stupe u kontakt sa kontrolorom Tasićem, u jednoj od pauza kada je frekvencija bila slobodna (ukupno 31 sekunda), i prenesu mu informaciju o dobijenom upozorenju. To bi kontroloru dalo dodatno vreme da uoči konflikt i izda odgovarajuće instrukcije. Međutim, postoji i mogućnost da, pre nego što se takva komunikacija realizuje, TCAS već izda RA (Resolution Advisory), oko 20 sekundi pre sudara, čime bi piloti bili obavezni da slede instrukcije koje je izdao TCAS bez obzira na instrukcije kontrolora. Takođe, oba vazduhoplova su bila vidljiva jedan drugom 32 sekunde pre udesa. Po prijemu TA upozorenja, tokom obavezne vizuelne provere, postoji verovatnoća da bi makar jedan pilot uočio drugi avion i reagovao u skladu sa sopstvenim znanjem i iskustvom, pod uslovom da TCAS u tom trenutku još nije izdao RA.

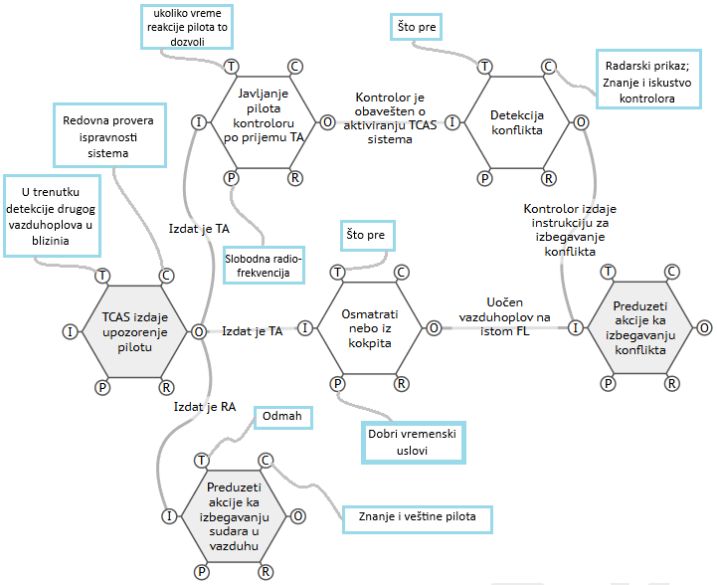
Iako TCAS predstavlja naprednu tehnologiju za izbegavanje sudara u vazduhu i vrlo verovatno bi sprečio sudar iznad Zagreba, treba uzeti u obzir da se samo preduzimanje neophodnih akcija na kraju svodi na posadu vazdohoplova. Konflikt u vazduhu je izuzetno stresna situacija kako za posadu vazduhoplova tako i za kontrolora, pa se pri proceni rizika mora uzeti u obzir i ljudski faktor. Slika 3 predstavlja šematski prikaz ovih FRAM funkcija i njihovih aspekata.

Preporuke za smanjenje procenjenog rizika primene TCAS sistema uključuju:

- Češće i detaljnije obuke vezane za funkciju TCAS sistema na vazduhoplovu, njegov način rada i procedure koje prate njegovu pravilnu upotrebu, kako za posadu vazduhoplova tako i za kontrolore letenja.
- Uvođenje procedura i sistema koji bi omogućili automatski prikaz upozorenja o aktiviranom TCAS-u na ekranu kontrolora letenja u čijoj su nadležnosti vazduhoplovi u konfliktu.

DRAFT VERZIJA

- Automatizacija izvršenja instrukcija TCAS-a u budućnosti, kada (i ukoliko) tehnologija i bezbednosni standardi to dozvole.



Slika 3: Funkcije FRAM-a nakon izdavanja TCAS upozorenja

4. ZAKLJUČAK

Primena metode funkcionalne analize rezonance na sudar iznad Zagreba pokazala se kao značajna za razumevanje kompleksnosti i varijabilnosti sistema upravljanja vazdušnim saobraćajem. FRAM metoda omogućava sagledavanje sistema kao dinamičke celine, gde se funkcije međusobno povezuju i utiču jedna na drugu, a ne kao skup izolovanih elemenata. Ovakav pristup je posebno koristan za identifikaciju potencijalnih izvora varijabilnosti, koji u određenim okolnostima mogu dovesti do kritičnih situacija.

ATM sistemi su inherentno kompleksni, jer uključuju tehničke sisteme, procedure i ljudski faktor, koji su podložni promenama i prilagođavanju u realnom vremenu. Varijabilnost u ovim sistemima može biti uzrokovana različitim faktorima, poput vremenskih uslova, radnog opterećenja kontrolora letenja ili nepredviđenih situacija u komunikaciji između uključenih strana. FRAM metoda pomaže da se ove varijacije ne posmatraju kao greške, već kao prirodni deo sistema koji treba razumeti i adekvatno upravljati njime. Primena ove metode pružila je dublji uvid u način na koji ATM sistemi funkcionišu i kako svakodnevne varijacije mogu eskalirati i dovesti do neželjenih ishoda. Primena ove metode doprinosi unapređenju bezbednosti vazdušnog saobraćaja i smanjenju verovatnoće pojave sličnih nesreća u budućnosti.

LITERATURA

Hollnagel, E. (2012). *FRAM, the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems*. Surrey: Ashgate.

Netjasov, F., & Babić, O. (2020). *Kontrola Letenja* (III izdanje). Beograd: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

Accidents Investigation Branch. (1982). *Report on the collision in the Zagreb area, Yugoslavia, on 10 September 1976.*

De Carvalho, P. V. R. (2011). The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*. *96*(11), 1482-1498. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.05.009

Perott, A., Schader, N. T., Leonhardt, J., & Licu, T. (2019). *Human Factors Integration in ATM System Design.* EUROCONTROL

Hollnagel, E. (2018). *Functional Resonance Analysis Method and Manual (Version 2).* Cambrensis (http://functionalresonance.com)

DRAFT VERSION

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

KOMPARACIJA KANO MODELA I KLASTER ANALIZE ZA OCENU ATRIBUTA KVALITETA ŽELEZNIČKIH USLUGA

BOJAN MIRKOVIĆ[1], DRAGANA MACURA[2], MILICA ŠELMIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd, bojan.m308@gmail.com, 0009-0009-4743-0722
[2] Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd, d.macura@sf.bg.ac.rs, 0000-0002-6439-7938
[3] Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd, m.selmic@sf.bg.ac.rs, 0000-0003-2507-3663

Rezime: *Cilj savremenog društva jeste smanjenje zagađenja životne sredine, pri čemu transport predstavlja jednog od najvećih zagađivača. Kroz sprovođenje različitih mera saobraćajne politike moguće je uticati na smanjenje obima drumskog saobraćaja i podsticanje većeg korišćenja železničkog transporta na globalnom tržištu, što bi, kao posledicu, imalo i značajno smanjenje negativnog uticaja transporta na životnu sredinu. U tom kontekstu, železnički putnički prevoznici teže povećanju broja putnika, a jedan od ključnih načina za postizanje tog cilja jeste unapređenje kvaliteta usluge i podizanje atraktivnosti železničkog saobraćaja. Pružanjem usluga višeg kvaliteta doprinosi se boljem korisničkom iskustvu i jačanju konkurentnosti ovog vida prevoza. Kao podrška donosiocima odluka u železničkim kompanijama koje se bave putničkim prevozom, modeli kao što su Kano model i Klaster analiza mogu biti dragoceni alati. Oni omogućavaju identifikaciju ključnih atributa kvaliteta usluge sa aspekta korisnika na konkretnom tržištu. U ovom radu predstavljene su prednosti i ograničenja ova dva pristupa u kontekstu upravljanja kvalitetom usluga železničkog putničkog prevoza.*

Ključne reči: *Kvalitet železničke usluge, Kano model, Klaster analiza.*

Abstract: *The goal of society as a whole is to reduce environmental pollution, and one of the biggest polluters is transportation. Through various transport policy measures, it is possible to reduce the volume of road transport and increase the share of rail transport in the global transport market, thereby decreasing pollution caused by transportation. Additionally, passenger rail operators aim to increase the number of passengers. Transport operators can enhance the attractiveness of rail transport by offering higher-quality services, thereby contributing to an overall better customer experience. Decision-making tools such as the Kano model and Cluster Analysis can assist managers in passenger rail companies by providing insight into the key quality attributes of rail services for a specific market. This paper presents the advantages and limitations of these two approaches to quality management of products/services, using the example of passenger rail transport services.*

Keywords: *Rail service quality, Kano model, Cluster analysis.*

1. UVOD

Bitan segment poslovanja prevoznika u putničkom železničkom saobraćaju, ali i u drugim vidovima saobraćaja, jeste usmerenost ka korisnički orijentisanom poslovanju. Ovakav pristup podrazumeva stavljanje potreba i preferencija korisnika, kako postojećih, tako i potencijalnih, u središte poslovne strategije. U uslovima tržišnog poslovanja i konkurencije sa drugim vidovima saobraćaja, od suštinskog je značaja meriti kvalitet pružene usluge i kroz analizu prikupljenih podataka identifikovati ključne atribute koji značajnije utiču na uspešnost poslovanja.

Povećanjem zadovoljstva uslugom od strane korisnika, prevoznici mogu ostvariti višestruke koristi. Pored direktnih efekata, kao što su veća lojalnost postojećih i privlačenje novih korisnika, prisutni su i indirektni benefiti, poput jačanja osećaja uključenosti korisnika u oblikovanje usluge, kao i doprinosa širenju pozitivne slike kompanije i jačanju poverenja u sistem putem lične preporuke. Sve to dugoročno doprinosi većoj atraktivnosti usluge i izgradnji snažnijeg brenda.

Cilj ovog rada jeste upoređivanje primene Kano modela i Klaster analize kao dva različita metodološka pristupa u ocenjivanju kvaliteta usluga u putničkom železničkom saobraćaju. Poseban akcenat stavljen je na

DRAFT VERSION

analizu njihove praktične primene u smislu razumevanja korisničkih očekivanja, načina obrade podataka i formulisanja preporuka za unapređenje usluga. Kroz uporednu analizu konkretnih primera, u radu se teži da se prikažu sličnosti i razlike u rezultatima koje ovi modeli daju, kao i njihove prednosti i ograničenja u kontekstu donošenja strateških odluka u saobraćajnim sistemima.

Ovaj rad je koncipiran na sledeći način. Nakon Uvoda, u drugom poglavlju je dat pregled relevantne literature. U trećem poglavlju su prikazane primene Kano modela i Klaster analize za ocenu i upravljanje atributima kvaliteta putničkih železničkih usluga. U četvrtom poglavlju je urađena komparativna analiza ova dva pristupa. Poslednje poglavlje posvećeno je zaključnim razmatranjima i budućim pravcima istraživanja.

2. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

U savremenim istraživanjima koja se bave analizom kvaliteta usluge u putničkom železničkom saobraćaju sve češće se primenjuju metode koje omogućavaju bolje razumevanje potreba i očekivanja korisnika. Posebno se izdvajaju Kano model i Klaster analiza. U nekim radovima ovi modeli se kombinuju sa drugim metodama kako bi se došlo do što pouzdanijih rezultata. Njihova primena postaje sve češća ne samo u železničkom, već i u drugim vidovima saobraćaja. Rad Huang i dr. (2022) prikazuje primenu metode Kano-Entropy-Topsis za sveobuhvatnu ocenu kvaliteta usluge u metro sistemu grada Čengdua (Kina). Kano modelom je prvenstveno omogućeno ocenjivanje i selekcija bitnih atributa iz grupe atributa kvaliteta usluge urbanih šinskih sistema i identifikacija razlika između očekivanja putnika i stvarnog stanja usluge. Korišćenjem Kano modela izdvojeni su ključni indikatori kvaliteta usluge, koji su potom rangirani prema stepenu osetljivosti uz primenu Entropy-Topsis pristupa. Na osnovu dobijenih rezultata utvrđeni su atributi metro sistema koje putnici najviše vrednuju kao što su mogućnost presedanja na istom nivou stanice, kvalitet usluge osoblja i čistoća stanica i garnitura. Autori zaključuju da prevoznik urbanog šinskog prevoza najpre treba da ispuni ove osnovne (must-be) atribute, jer upravo oni najviše utiču na zadovoljstvo korisnika. Potom se predlaže unapređenje jednodimenzionih i privlačnih atributa čime bi se povećala lojalnost kod postojećih korisnika i privukli novi korisnici.

Sličan pristup koristi se i u radu autora Dong (2025) gde se primenom Kano modela i linearne regresije teži oceni kvaliteta različitih usluga na stanicama vozova velikih brzina. Cilj istraživanja bio je da se identifikuju ključni atributi koji utiču na zadovoljstvo tokom boravka u stanicama uzimajući u obzir različite elemente usluge kao što su akustika objekta, temperatura, osvetljenje, kvalitet vazduha, arhitektonski bonitet objekta, tokovi kretanja putnika, higijena, tarifna i informaciona infrastruktura, komercijalni sadržaji i sl. Ispitivanje je vršeno pomoću upitnika na stanicama kao i putem interneta, a validnost podataka je naknadno proverena kroz analize validnosti i pouzdanosti. Kano modelom su određeni atributi svrstani u kategoriju „Must-Have Quality“, a to su pre svega kvalitet vazduha, temperatura u objektu, tokovi kretanja putnika u stanici, higijena i informaciona infrastruktura. Dodatnom analizom pomoću linearne regresije preciznije su utvrđeni atributi koje je potrebno unaprediti i date su smernice za dalje usmerenje poslovanja.

U radu Jomnonkwao i dr. (2020) autori upoređuju klaster analizu, faktorsku analizu i analizu važnosti i performansi (IPA) sa ciljem ocene kvaliteta usluge daljinskog putničkog železničkog prevoza na Tajlandu. Cilj ovog rada bio je da se, na osnovu percepcije i očekivanja korisnika i primenom različitih metoda, identifikuju ključni indikatori kvaliteta koji najviše utiču na zadovoljstvo uslugom i odrede prioriteti za poboljšanje. Podaci su prikupljeni od 615 putnika na železničkim stanicama u šest tajlandskih provincija putem standardizovanog upitnika. Kombinovanjem klaster i faktorske analize izdvojene su četiri grupe sa ukupno 45 atributa: kvalitet vozila, osoblje, dodatne usluge i stanice. Pomoću analize važnosti i performansi (IPA) je identifikovano sedam ključnih atributa, pretežno vezanih za sigurnost na stanicama i u vozovima, čistoću kola, ispravnost kola i tačnost usluge. Ovih sedam atributa je od izuzetne važnosti, ali su ih korisnici nisko ocenili, stoga je njihovo hitno unapređenje neophodno. Krajnji rezultat studije bio je predlog unapređenja daljinskog putničkog železničkog saobraćaja na Tajlandu, a time i povećavanje zadovoljstva uslugom i privlačenje novih korisnika u sistem.

Rad autora Tareke, K. M. (2024) analizira kvalitet usluge na železničkoj pruzi Etiopija - Džibuti primenom Kano modela i višestruke linearne regresije. Cilj istraživanja bio je da se identifikuju ključni atributi koji utiču na zadovoljstvo korisnika u putničkom i teretnom saobraćaju, kao i da se pruže smernice za unapređenje usluge. Ispitivanje je vršeno na uzorku od 586 korisnika (376 putnika i 210 špeditera) na tri najveće stanice na pruzi. Rezultati su pokazali značajno bolji položaj železničkih usluga u odnosu na ostale vidove saobraćaja. U okviru ovog istraživanja, pouzdanost, klimatizacija, vreme putovanja, informisanje i čistoća pokazali su se kao atributi koji imaju najveći uticaj na zadovoljstvo korisnika, dok su za neke atributе kao što su dostupnost platnih opcija i osoblje dobijeni niski nivoi značaja. Zaključci studije bi trebalo da dovedu do tržišno orijentisanog poslovanja železnica, što bi dugoročno dovelo do značajne uštede u investicijama.

DRAFT PAPER

Analizom relevantnih studija može se zaključiti da su Kano model i Klaster analiza postale značajne metode u istraživanjima kvaliteta usluge u putničkom železničkom saobraćaju. Kano model omogućava identifikaciju i klasifikaciju atributa usluge prema uticaju na zadovoljstvo korisnika, dok Klaster analiza pruža uvid u strukturu korisnika i njihova očekivanja. Radovi koji primenjuju ove metode, bilo zasebno ili u kombinaciji sa drugim pristupima (kao što su regresione analize ili IPA), pokazali su da se na osnovu dobijenih rezultata mogu precizno odrediti prioriteti za unapređenje usluge i efikasnu raspodelu resursa. Istraživanja su sprovedena u različitim kontekstima, od metro sistema u Kini, preko međugradskih vozova u Tajlandu, do međunarodne železničke linije u Istočnoj Africi, što potvrđuje da je primena ovih modela korisna za razumevanje korisničkih potreba u različitim sistemima i sredinama. Time se stvara osnova za dalji razvoj sistema putničkog železničkog saobraćaja u skladu sa principima korisničko orijentisanog poslovanja.

3. PRIMENA KANO MODELA I KLASTER ANALIZE ZA OCENU ATRIBUTA KVALITETA ŽELEZNIČKIH USLUGA

U nastavku su prikazane primene Kano modela i Klaster analize za ocenu atributa kvaliteta putničkih železničkih usluga kao i rezultati do kojih se došlo. Istraživanje je urađeno tokom 2024. godine, na uzorku od 100 ispitanika. Analizirano je 10 atributa kvaliteta putničkih železničkih usluga: A1 - tačnost, A2 - bezbednost, A3 - frekventnost, A4 - odnos zaposlenih prema putnicima, A5 - besplatan WiFi u vozu, A6 - odnos zaposlenih na šalterima u stanicama prema putnicima, A7 - vreme putovanja, A8 - higijena u vozu, A9 - udaljenost železničke stanice, i A10 - pristupačnost stanici. Cilj istraživanja nije bio da se oceni zadovoljstvo ispitanika - korisnika železničkih usluga, niti kvalitet usluge, već da se prikaže mogućnost primene predloženih pristupa, kao i da se istaknu njihove specifičnosti.

Kano model je alat za analizu podataka, odnosno za definisanje potreba i očekivanja korisnika usluga/proizvoda, a koji pomaže menadžmentu kompanija da razumeju različite karakteristike usluga/proizvoda i određenim merama utiču na korisničko zadovoljstvo. Najčešće se koristi u razvoju usluga/proizvoda, marketingu, upravljanju kvalitetom usluga i korisničkom iskustvu. Kano model je posebno koristan kod inovacija, jer ističe atribute koji mogu pozitivno iznenaditi korisnike usluga/proizvoda.

Klaster analiza se koristi kako bi se elementi grupisali prema svojoj sličnosti u grupe ili klase. Cilj je da se otkriju prirodne grupe u podacima, koji su međusobno što sličniji, a opet što različitiji od elemenata drugih klastera. Najčešće se primenjuje u marketingu, medicini, ekologiji, psihologiji i sociologiji.

3.1. Primena Kano modela

U ovom radu anketirani su ispitanici, korisnici železničkih usluga, sa ciljem da se ocene atributi kvaliteta železničkih usluga, odnosno da se odrede aktivnosti kompanije koje najviše mogu doprineti većem zadovoljstvu korisnika. Primenom Kano modela izvšeno je grupisanje atributa prema stepenu važnosti i zadovoljstvu korisnika putničkih železničkih usluga.

Kano model je baziran na principu da se zadovoljstvo korisnika posmatra u odnosu na svaki atribut kvaliteta usluge i sa pozitivnog i sa negativnog aspekta. Nakon sprovedenog istraživanja, prikupljeni podaci se obrađuju i definišu se prosečni nivoi zadovoljstva korisnika u odnosu na pozitivan i negativan aspekt atributa, i u zavisnosti od njihovih vrednosti, atributi se grupišu u jednu od sledećih pet kategorija:

1) osnovni atribut – obavezan atribut usluge, ali nije dovoljan uslov za zadovoljstvo korisnika
2) jednodimenzionalni atribut – zadovoljstvo korisnika se linearno menja sa promenom vrednosti ovog atributa
3) atraktivni atribut – zadovoljstvo korisnika se izrazito povećava sa porastom vrednosti ovog atributa, ali sa druge strane, ne postoji odgovarajući pad zadovoljstva ukoliko vrednost atributa opada
4) indiferentni atribut – zadovoljstvo korisnika nije u funkciji od vrednosti ovog atributa
5) reverzibilni atribut – zadovoljstvo korisnika opada sa povećanjem vrednosti ovog atributa.

Za primenu Kano modela korišćene su formule koje su detaljnije predstavljene u radovima (Macura i Šelmić, 2019; Kilibarda, 2016; Meng i dr, 2011).

Za svaki atribut kvaliteta usluge, definisana je srednja vrednost zadovoljstva korisnika za određeni atribut kvaliteta usluge, i za negativni aspekt ($\overline{X_i}$) i za pozitivni aspekt ($\overline{Y_i}$).

$$\overline{Y_i} = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J} w_{ij} \cdot y_{ij} \quad (1)$$

$$\overline{X_i} = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J} w_{ij} \cdot x_{ij} \quad (2)$$

Gde su:

x_{ij} – ocena *j*-tog ispitanika za negativni aspekt *i*-tog atributa
y_{ij} – ocena *j*-tog ispitanika za pozitivni aspekt *i*-tog atributa
w_{ij} – težina *j*-tog ispitanika za *i*-ti atribut kvaliteta usluge

Nakon što se izračunaju vrednosti $\overline{Y_i}$ i $\overline{X_i}$ za svaki atribut kvaliteta usluge, atributi mogu biti klasifikovani na sledeći način:

- ako je $\overline{Y_i} < 0{,}5$ i $\overline{X_i} \geq 0{,}5$, onda atribut a_i pripada skupu „obaveznih“ atributa;
- ako je $\overline{Y_i} \geq 0{,}5$ and $\overline{X_i} \geq 0{,}5$, onda atribut a_i pripada skupu „jednodimenzionalnih“ atributa;
- If $\overline{Y_i} \geq 0{,}5$ and $\overline{X_i} \leq 0{,}5$, onda atribut a_i pripada skupu „atraktivnih“ atributa;
- If $\overline{Y_i} < 0{,}5$ and $\overline{X_i} < 0{,}5$, onda atribut a_i pripada skupu „indiferentnih“ atributa.

Rezultati sprovedenog istraživanja pokazuju pripadnost razmatranih atributa kvaliteta putničkih železničkih usluga jednoj od navedenih pet grupa atributa kao što je prikazano u Tabeli br. 1.

Tabela 1: Kategorizacija razmatranih atributa

Atribut	
Obavezni	A4
Jednodimenzionalni	A1, A2, A3, A7, A8, A9 i A10
Atraktivni	/
Indiferentni	A5 i A6
Reverzibilni	/

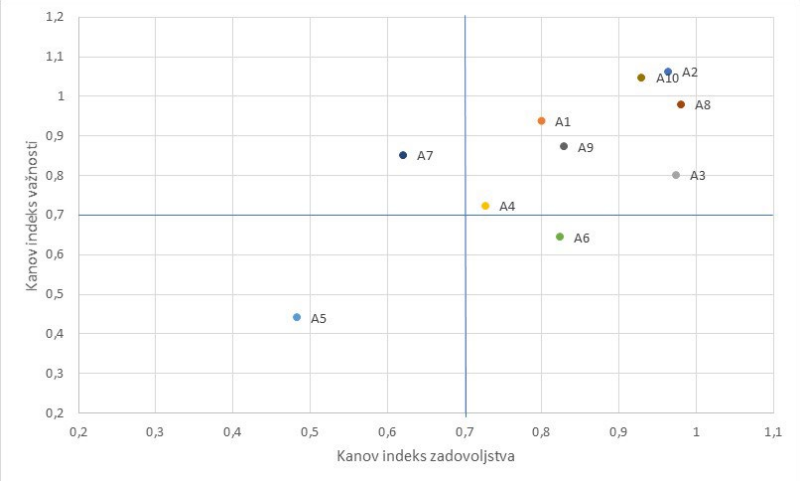
Atributi železničke usluge a_i mogu se predstaviti kao vektori:

$$k_i = (k_i, \alpha_i) \quad (3)$$

$$|k_i| = \sqrt{\overline{X^2} + \overline{Y^2}} \quad (4)$$

$$\alpha_{i=}\ tan^{-1}\left(\frac{\overline{Y_i}}{\overline{X_i}}\right) \quad (5)$$

Vektor k_i predstavlja „Kano indeks važnosti” ($0 \leq |k_i| \leq \sqrt{2}$), a α „Kano indeks zadovoljstva” ($0 \leq \alpha_i \leq \frac{\pi}{2}$). Na osnovu ova dva indeksa, izvršena je klasifikacija atributa železničkih usluga (Slika 1). Domen atributa železničkih usluga podeljen je u četiri kvadranta, na osnovu dve dimenzije. Horizontalna dimenzija predstavlja zadovoljstvo korisnika u odnosu na posmatrani atribut usluge, a vertikalna dimenzija značaj atributa kvaliteta usluge. Prema različitom stepenu zadovoljstva i stepenu važnosti mogu se predložiti adekvatne mere za poboljšanje atributa putničkih železničkih usluga.



Slika 1. Kano model – indeks zadovoljstva i važnosti atributa

U prvom kvadrantu nalaze se atributi (A5 – besplatan WiFi u vozu) koji ne poseduju visok nivo percepcije korisnika u pogledu indeksa zadovoljstva i indeksa važnosti, te je preporuka da se ne troše dodatni resursi za poboljšanje ovih atributa usluge. U drugom kvadrantu se nalaze atributi (A6 – odnos zaposlenih na

DRAFT VERZIJA

šalterima u stanicama prema putnicima) koji imaju visok nivo indeksa zadovoljstva korisnika, ali nivo percepcije važnosti ovog atributa nije previše visok. Ukoliko je potrebno redukovati troškove usluge, ovi atributi se ne moraju inovirati i neće ostaviti značajnije negativne posledice na zadovoljstvo korisnika. Međutim, ako kompanija ima resurse da uloži u inoviranje ovih atributa usluge, to može i učiniti i doprineti povećanje zadovoljstva korisnika. Treći kvadrant sadrži atribute (A1 – tačnost, A2 – bezbednost, A3 – frekventnost, A4 – odnos zaposlenih prema putnicima, A8 – higijena u vozu, A9 – udaljenost železničke stanice, i A10 – pristupačnost stanici) usluga koje korisnik smatra važnim i koje veoma utiču na njegovo zadovoljstvo. Ovaj kvadrant se smatra velikim područjem za napredak. Četvrti kvadrant sadrži atribut (A7 – vreme putovanja) usluge koji su važni za korisnika, ali koji još uvek nisu ispunili očekivanja. Ovaj kvadrant se smatra područjem za inovacije i poboljšanje.

3.2. Primena Klaster analize

Klaster analiza se koristi kako bi se elementi grupisali prema svojoj sličnosti u grupe ili klase. U ovom radu posmatrani su ispitanici, korisnici železničkih usluga, a grupisanje je izvršeno prema njihovim ocenama atributa kvaliteta železničke usluge.

Primenjena je *K*-means metoda, i pripadnost korisnika određenoj grupi je određena preko Euklidskog rastojanja od centra grupe. Za određivanje pripadnosti nekog putnika određenoj grupi računa se Euklidsko rastojanje za svakog putnika u odnosu na svaki predefinisan centar (Formula 1), odnosno računa se koliko je određeni putnik „udaljen“ od centra svake grupe. Na kraju, putnika „dodeljujemo“ grupi čiji mu je centar najbliži.

$$\mathbf{d}\ (\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (A_i - B_i)^2} \qquad (6)$$

Gde su:

$d(A,B)$ – udaljenost putnika A od centra grupe B

N – broj atributa kvaliteta usluge, $i=1,...,N$

A_i – vrednost i-tog atributa putnika A

B_i – vrednost i-tog atributa centra grupe B

Grupe koje su definisane kao relevantne za dalju analizu su: nisko, umereno i visoko zadovoljstvo. Na ovaj način dobijena su tri segmenta korisnika, a zatim preporučene različite mere kako bi se upravljalo stepenom zadovoljstva.

Korisnici iz prvog klastera, „Nisko zadovoljstvo“, imaju nisko zadovoljstvo gotovo u svim aspektima usluge. U prikazanom primeru, nezadovoljni korisnici čine manjinu. Izuzetno niska ocena je za dva atributa – tačnost i vreme putovanja, ali i osnovni atributi kao što su bezbednost i higijena u vozu imaju niske ocene. Može se zaključiti da su ovi korisnici imali loša prethodna iskustva ili veća očekivanja za železničke usluge. Klaster „Umereno zadovoljstvo“ čine korisnici koji imaju srednje zadovoljstvo, a najniže ocenjen atribut je pristupačnost. Ukoliko bi cilj menadžmenta kompanije bio da se poboljša iskustvo korišćenja železničkih usluga ovih korisnika, preporuka bi bila da usmere aktivnosti na fizičku i vizuelnu dostupnost usluga. Na kraju, korisnike usluga koji su pripadnici klastera „Visoko zadovoljstvo“, čine oni koji su najzadovoljniji kvalitetom železničkih usluga. Svi aspekti usluge su visoko ocenjeni, što može ukazivati na dobar doživljaj usluge. Ovi korisnici doživljavaju uslugu kao izuzetno kvalitetnu i predstavljaju idealnu ciljnu grupu za zadržavanje i lojalnost.

4. KOMPARACIJA KANO MODELA I KLASTER ANALIZE

Kano model klasifikuje atribute u kategorije kao što su obavezni, atraktivni, jednodimenzionalni, indiferentni i reverzibilni. Služi za razvrstavanje atributa usluge prema njihovom uticaju na korisničko zadovoljstvo. Prednost primene Kano modela je to što pruža mogućnost menadžmentu kompanije da bolje razume potrebe korisnika njenih usluga. Rezultati Kano modela prikazuju prioritete u pogledu razvoja i inovacija proizvoda ili usluga. Preporuka za donosioce odluka bi bila da ne ulažu u poboljšanje atributa usluge koji su već dostigli visok nivo zadovoljstva korisnika, svrsihodnije je ulagati u jednodimenzionalne ili atraktivne atribute kvaliteta usluge, jer oni stvaraju veći uticaj na zadovoljstvo korisnika. Ukoliko se dva atributa ne mogu poboljšati istovremeno zbog tehničkih ili finansijskih ograničenja, prvo treba razmotriti atribut koji ima veći uticaj na zadovoljstvo korisnika. Pored navedenog, prednosti Kano modela su to što je efikasan za brzo donošenje odluka, relativno lak za primenu kroz upitnike, pomaže u alokaciji resursa prema efektu na zadovoljstvo korisnika, i fokusira se na uticaj svakog pojedinačnog atributa.

DRAFT VERZIJA

Sa druge strane, Klaster analiza služi za grupisanje atributa ili korisnika na osnovu sličnosti u ponašanju, percepciji ili odgovorima. Otkriva skrivene obrasce među podacima. Prednosti Klaster analize su to što je ovo fleksibilan pristup za različite oblike podataka, pronalazi grupe atribute ili korisnika sa sličnim obrascima i može otkriti neočekivane relacije. Rezultat je segmentacija atributa ili korisnika.

Oba pristupa imaju i svoje nedostatke. Kano model može biti subjektivan, te zahteva dobro formulisane upitnike i nije intuitivan za korisnike, ne uzima u razmatranje statističke međuzavisnosti i intenzitet atributa bez dodatnih analiza. Kada se primenjuje Klaster analiza rezultat zavisi od broja klastera i metrike udaljenosti. Klaster analiza ne daje interpretaciju rezultata, te je potrebno dodatno tumačenje nakon grupisanja atributa ili korisnika po grupama.

Kombinovana primena ova dva pristupa daje najbolje rezultate, odnosno preciznije i korisnički usmerene odluke. Primenom Kano modela uradila bi se klasifikacija atributa, a zatim pomoću Klaster analize bi se otkrili obrasci među korisnicima prema njihovom doživljaju tih atributa. Sinergija oba pristupa obezbeđuje balans između teorijskog značaja atributa i empirijske grupacije za strateško upravljanje kvalitetom usluge i zadovoljstvom korisnika usluga.

5. ZAKLJUČAK

Usmerenost ka korisnicima postaje ključni element poslovanja prevoznika u putničkom železničkom saobraćaju. Ovakav pristup podrazumeva stavljanje potreba i očekivanja korisnika u središte poslovne strategije. U konkurenciji sa drugim vidovima transporta, važno je kontinuirano pratiti i analizirati kvalitet usluga. Identifikacija ključnih atributa kvaliteta omogućava unapređenje usluge i jačanje konkurentske pozicije prevoznika. Zadovoljstvo korisnika donosi brojne koristi, kako direktne (lojalnost i privlačenje novih korisnika), tako i indirektne (pozitivan imidž, lične preporuke i poverenje u sistem). Time se doprinosi dugoročnoj atraktivnosti usluge i razvoju snažnog brenda.

U ovom radu analiziraju se Kano model i Klaster analiza kao dva različita pristupa u ocenjivanju kvaliteta železničkih usluga. Fokus je na njihovoj primeni u razumevanju korisničkih očekivanja i formulisanju preporuka za unapređenje. Kroz poređenje rezultata, predstavljene su njihove prednosti i ograničenja. Cilj je da se doprinese boljem strateškom odlučivanju u kompanijama koje pružaju železničke usluge prevoza putnika.

Buduća istraživanja biće usmerena ka razvoju hibridnog modela koji bi koristio Kano model za ocenu atributa kvaliteta usluge, a zatim Klaster analizu za grupisanje atributa prema drugim karakteristikama, kao što su vreme, finansijski i ljudski resursi za unapređenje atributa kvaliteta putničkih železničkih usluga. Takođe primenom Klaster analize mogli bi da se definišu skriveni obrasci među korisnicima prema njihovom doživljaju posmatranih atributa kvaliteta putničkih železničkih usluga, što bi dalje bilo korisno za primenu ciljnog marketinga.

LITERATURA

Huang, W., Zhang, Y., Xu, Y., Zhang, R., Xu, M., & Wang, Y. (2022). Urban rail transit passenger service quality evaluation based on the KANO–Entropy–TOPSIS model: the China case. *Transport*, *37*(2), 98–109. https://doi.org/10.3846/transport.2021.16003

Dong, W., Qi, R., Wang, D., Zhang, W., & Liu, X. (2025). Service Quality Assessment and Optimization of High-Speed Railway Waiting Halls Using a Kano Model and Multidimensional Questionnaire Analysis. *Buildings*, *15*(8), 1212. https://doi.org/10.3390/buildings15081212

Jomnonkwao, S., Champahom, T., & Ratanavaraha, V. (2020). Methodologies for Determining the Service Quality of the Intercity Rail Service Based on Users' Perceptions and Expectations in Thailand. *Sustainability*, *12*(10), 4259. https://doi.org/10.3390/su12104259

Tareke, K. M. (2024). Customer Satisfaction with Ethio-Djibouti Railway Transportation Services: An Analysis Using the KANO Model. *Journal of African Development Studies*, *11*(2), 34–48. https://doi.org/10.56302/jads.v11i2.11211

Macura, D., Šelmić, M. (2019). Designing of customer-oriented railway service using the Kano model. *First International Symposium „Rail Transport in the Modern World", Belgrade, Serbia*

Kilibarda, M. (2016). Innovation in logistics services using the Kano model. *Advanced Quality, Vol. 44, No. 4*

Meng, Q., Zhou, N., Tian, J., Chen, Y., Zhou F. (2011). Analysis of logistics service attributes based on quantitative Kano model: A case study of express delivering industries in China. *Journal of Service Science and Management 4,* 42-51.

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

KOLIKO KOŠTA ZANEMARIVANJE DEGRADACIJE BATERIJE: INTEGRISANI MODEL ZA ELEKTRIFIKACIJU AUTOBUSKIH LINIJA

THE COST OF NEGLECTING BATTERY DEGRADATION: AN INTEGRATED MODEL FOR BUS LINE ELECTRIFICATION

MARKO STOKIĆ[1], BRANKA DIMITRIJEVIĆ[2], VLADIMIR MOMČILOVIĆ[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, m.stokic@sf.bg.ac.rs, 0000-0003-1736-1729
[2] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, b.dimitrijevic@sf.bg.ac.rs, 0000-0002-8102-7605
[3] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, v.momcilovic@sf.bg.ac.rs, 0000-0002-4096-0781

Rezime: *U ovom radu je predstavljen model za elektrifikaciju mreže autobuskih linija javnog gradskog transporta putnika. Model određuje broj, lokacije i snage punjača, kao i kapacitete baterija uz razmatranje uticaja degradacije tokom eksploatacije na rešenja. Model je primenjen na četiri autobuske linije u Beogradu na kojima su trenutno u eksploataciji autobusi sa pogonom na dizel gorivo. Rezultati pokazuju da zanemarivanje degradacije baterija može dovesti do značajnog potcenjivanja ukupnih troškova implementacije, sa razlikom od oko milion evra godišnje u slučaju posmatranih linija. Primenom razvijenog modela omogućava se realnija procena investicija i podržava uspešna tranzicija ka održivom javnom transportu putnika, korišćenjem alata za preciznije planiranje infrastrukture i smanjenje finansijskih rizika.*

Ključne reči: *električni autobusi, eksploatacioni vek baterija, energetska podrška.*

Abstract: *A comprehensive urban bus network electrification model for urban public passenger transport is presented in this paper. The model simultaneously determines the required number, locations, and power ratings of chargers, as well as battery capacities, considering battery degradation over the lifecycle. The approach is applied to four diesel-powered urban bus lines in Belgrade. Results indicate that neglecting battery degradation would eventually lead to a substantial understatement of total costs—by roughly €1 million per year on the considered lines alone. By incorporating degradation effects, the developed model enables more realistic investment assessments and supports a successful transition to sustainable urban transport, providing a tool for more accurate infrastructure planning and reduced financial risk.*

Keywords: *electric buses, battery lifecycle, energy support.*

1. UVOD

Elektrifikacija javnog gradskog transporta putnika (JGTP) jedan je od ključnih koraka u postizanju održive mobilnosti i poboljšanju kvaliteta vazduha u gradskim sredinama. U tom kontekstu, implementacija električnih autobusa (e-autobusa) zahteva pažljivo planiranje njihove energetske podrške i optimizaciju infrastrukture, posebno u pogledu postavljanja punjača i upravljanja procesom punjenja i pražnjenja baterija. Brojni autori razvili su lokacijske modele za optimalno postavljanje punjača, s ciljem minimizacije ukupnih troškova funkcionisanja sistema [1–10] u kojima se zanemaruje degradacija baterije, iako čini značajan udeo u troškovima nabavke i eksploatacije električnih vozila [11]. Degradacija baterije se ogleda u smanjenju kapaciteta, koji kada dostigne 70–80% inicijalne vrednosti, smatra se da je bateriju potrebno zameniti, što značajno uvećava ukupne troškove funkcionisanja sistema [12]. Veliki broj prevoznika se opredeljuje za koncepciju punjenja baterija preko noći do maksimalnog kapaciteta, kako bi sutradan mogli da koriste e-autobuse sa najvećom mogućom autonomijom i velikim dubinama pražnjenja, što uzrokuje veće degradacije baterije [13]. S obzirom na pomenute visoke troškove i trajanje eksploatacionog veka baterije, analiziran je značaj razmatranja degradacije baterije još tokom planiranja implementacije e-autobusa u sistem JGTP, što će biti i kvantifikovano na konkretnim autobuskim linijama u Beogradu.

U ovom radu je predstavljen troškovni model za elektrifikaciju celokupne ili delimične mreže linija JGTP e-autobusima opremljenim litijum-ferofosfatnim (LFP) baterijama (engl. Battery Electrification Model-

DRAFT VERZIJA

BEM). Primarna motivacija za razvoj BEM modela jeste unapređenje implementacije e-autobusa sa LFP baterijama u sistem JGTP, pri čemu se eksplicitno uzima u obzir realna degradacija LFP baterija, što se u postojećim pristupima često zanemaruje.

2. RAZVOJ BEM MODELA

Standardna praksa u elektrifikaciji JGTP podrazumeva upotrebu e-autobusa koji se u najvećoj meri pune tokom noći u autobazama. Međutim, zbog toga što ova vozila često rade i preko 20 sati dnevno, vreme dostupno za punjenje ograničeno je na nekoliko sati, što stvara izazove u planiranju rada i rasporeda punjenja. U takvim uslovima od ključne je važnosti precizno odrediti broj, snagu i ukupni kapacitet punjača u autobazama, kao i adekvatan kapacitet LFP baterija u e-autobusima, kako bi se osigurala pouzdana eksploatacija na svim linijama tokom dana. U tom smislu, razvijen je BEM model koji ispunjava prethodno navedene zahteve, uz eksplicitno uključivanje degradacije baterija kao značajnog faktora u ukupnim troškovima implementacije e-autobusa.

Matematička formulacija BEM modela data je u nastavku u obliku problema mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. Ulazni podaci za BEM model prikazani su u tabeli .

Tabela 1. Skupovi, indeksi, parametri i promenljive BEM modela

Skupovi i indeksi:	
O	Skup autobaza (potencijalnih lokacija) za postavljanje punjača
o	Indeksi autobaza (potencijalnih lokacija) za postavljanje punjača
T	Skup početnih i krajnjih terminusa
i, j	i – indeks početnih terminusa, j – indeks krajnjih terminusa
N	Skup autobuskih stajališta
k, l	Indeksi autobuskih stajališta
T^i	Skup krajnjih terminusa u kojima se završavaju linije koje počinju u terminusu i
Z	Skup kapaciteta LFP baterija na e-autobusima
z	Indeksi kapaciteta LFP baterija
C	Skup snaga punjača
c	Indeksi snaga punjača
Parametri:	
∂_{ij}	Postojanje linije *i-j* (1 ako postoji linija *i-j*, 0 u suprotnom)
b_{ijkl}	Sledljivost čvorova na liniji *i-j* (1 ako čvor l sledi čvor k na liniji *i-j*, 0 u suprotnom)
n_{ij}	Broj autobusa na liniji *i-j*
nr_{ij}	Broj polazaka merodavnog autobusa na liniji *i-j*
p	Redni broj polaska na liniji *i-j* $1 \leq p \leq nr_{ij}$
v_{iji}	Definisanje početnog terminusa (1 ako prva vožnja na liniji *i-j* počinje iz terminusa i, 0 u suprotnom)
D_z^{max}	Maksimalni kapacitet LFP baterije z [Wh]
D_z^{min}	Minimalni kapacitet LFP baterije z [Wh]
d_{kl}	Potrošnja energije između čvorova k i l [Wh]
d_{di}	Potrošnja energije između autobaze i početnog terminusa i (tzv. nulta vožnja) [Wh]
d_{jd}	Potrošnja energije između krajnjeg terminusa j i autobaze [Wh]
W_z	Cena autobusa [€]
LFP_z	Cena LFP baterije kapaciteta z [€]
T_{oc}	Trošak postavljanja punjača snage c u autobazu o [€]
LC_{bus}	Eksploatacioni vek autobusa [godina]
LC_{lfp_zij}	Eksploatacioni vek LFP baterije kapaciteta z na liniji *i-j* [godina]
V_c	Kapacitet opsluge punjača snage c [Wh/s]
γ	Efikasnost punjača
$t_{autobaza}$	Dozvoljeno vreme punjenja u autobazi [s]
λ_{ij}	Ukupni zahtevi za električnom energijom e-autobusa sa linije *i-j*
μ_{ij}	Ukupan kapacitet punjača u autobazi koji opslužuju e-autobuse sa linije *i-j*
M	Veliki broj
ρ_{ij}	Ako je neparan broj poluobrta na liniji *i-j* onda 1, ako je paran onda 0

DRAFT VERZIJA

π_{ijo}	Pripadnost linije *i-j* autobazi *o* (1 ako e-autobusi sa linije *i-j* pripadaju autobazi *o*, 0 u suprotnom)
Promenljive:	
B_{zij}	Određivanje kapaciteta superkondenzatora (1 ako je autobus kapaciteta *z* angažovan na liniji *i-j*, 0 u suprotnom)
SOC_{ijkp}	Količina električne energije koju autobus ima u *p*-tom polasku kada stigne u čvor *k* dok se kreće na liniji *i-j* [Wh]
R_{ijoc}	Određivanje lokacije punjača (1 ako se punjač snage *c* postavi u autobazi *o* da snabdeva autobuse sa linije *i-j*, 0 u suprotnom)
N_{ijoc}	Broj punjača kapaciteta *c* u autobazi *o* koji opslužuju autobuse sa linije *i-j*

Funkcija cilja (F) obuhvata tri komponente troškova: postavljanja punjača u autobazama, nabavke e-autobusa i nabavke LFP baterija, koje se minimiziraju. Troškovi su analizirani za period od 24 godine, pri čemu se komponente nabavke e-autobusa i LFP baterija ponderišu u skladu sa njihovim eksploatacionim vekom.

$$min\, F = \sum_{i\in T}\sum_{j\in T^i}\sum_{o\in O}\sum_{c\in C} T_{oc}\cdot N_{ijoc} + \frac{24}{LC_{bus}}\cdot\sum_{i\in T}\sum_{j\in T^i}\sum_{z\in Z} n_{ij}\cdot W_z\cdot B_{zij} + \frac{24}{LC_{lfp_{zij}}} \cdot\sum_{i\in T}\sum_{j\in T^i}\sum_{z\in Z} n_{ij}\cdot LFP_z\cdot B_{zij} \quad (1)$$

Pri sledećim ograničenjima:

$$\sum_{c\in C} R_{ijoc} \le \pi_{ijo};\ \forall\, i\in T, j\in T^i, o\in O \quad (2)$$

$$N_{ijoc} \le R_{ijoc}\cdot n_{ij};\ \forall\, i\in T, j\in T^i, o\in O, c\in C \quad (3)$$

$$SOC_{ijkp} \le D_z^{max} + \left(1-B_{zij}\right)\cdot M;\ \forall\, i\in T, j\ \in\ T^i, k\in N, p=1,\dots,nr_{ij}\,, z\in Z \quad (4)$$

$$SOC_{ijkp} \ge D_z^{min}\cdot B_{zij};\ \forall\, i\in T, j\ \in\ T^i, k\in N, p=1,\dots,nr_{ij}\,, z\in Z \quad (5)$$

$$\sum_{z\in Z} B_{zij} = \partial_{i,j};\ \ \forall\, i\ \in\ T, j\in T^i \quad (6)$$

$$B_{zij} = B_{zji};\ \forall\, i\in T, j\ \in\ T^i, z\in Z \quad (7)$$

$$\left(SOC_{ijlp} - SOC_{ijkp} + d_{kl}\right)\cdot b_{ijkl} = 0;\ \ \forall\, i\in T, j\in T^i, k,l\in N, p=1,\dots,nr_{ij} \quad (8)$$

$$SOC_{iji1} = v_{iji}\cdot\sum_{z\in Z} B_{zij}\cdot\left(D_z^{max} - d_{di}\right) + \left(1-v_{iji}\right)\cdot SOC_{jii1};\ \forall\, i\in T, j\ \in\ T^i \quad (9)$$

$$SOC_{ijip} = SOC_{jiip-1}\cdot v_{iji} + \left(1-v_{iji}\right)\cdot\ SOC_{jiip};\ \ \forall\, i\in T, j\in T^i, p=2,\dots,nr_{ij} \quad (10)$$

$$SOC_{ijjp}\cdot v_{iji}\cdot\rho_{ij} + SOC_{jiip}\cdot v_{iji}\cdot(1-\rho_{ij}) \ge \sum_{z\in Z} B_{zij}\cdot D_z^{min} + d_{jd};\ \forall\, i\in T, j\in T^i, p = nr_{ij} \quad (11)$$

$$\lambda_{ij} = n_{ij}\cdot\textstyle\sum_{z\in Z} B_{zij}\cdot D_z^{max} + d_{jd} - SOC_{ijjp}\cdot v_{iji}\cdot\rho_{ij} - SOC_{jiip}\cdot v_{iji}\cdot(1-\rho_{ij});\ \forall\, i\in T, j\in T^i, p = nr_{ij} \quad (12)$$

$$\mu_{ij} = \textstyle\sum_{c\in C} N_{ijoc}\cdot V_c\cdot\gamma;\ \forall\, i\in T, j\in T^i, o\in O \quad (13)$$

$$\lambda_{ij} \le t_{autobaza}\cdot\mu_{ij};\ \forall\, i\in T, j\in T^i \quad (14)$$

$$B_{zij}, R_{ijoc} \in \{0,1\};\ \forall\, i\in T, j\in T^i, k\in N, z\in Z, o\in O, c\in C \quad (15)$$

$$SOC_{ijkp}, N_{ijoc} \ge 0;\ \ \forall\, i\in T, j\ \in\ T^i, k\in N, p=1,\dots,nr_{ij} \quad (16)$$

Ograničenja (2) definišu da se za svaku liniju u odgovarajućoj autobazi mogu postaviti homogeni punjači određene snage, dok je dozvoljeno korišćenje punjača različitih snaga za e-autobuse sa drugih linija. Takođe, nije dozvoljeno postavljanje punjača za liniju koja ne pripada datoj autobazi. Ograničenja (3) zahtevaju da broj punjača određene snage ne premaši broj e-autobusa na liniji. Ograničenja (4) i (5) osiguravaju da nivo napunjenosti baterije ostane unutar definisanih granica, uzimajući u obzir potrošnju i poremećaje u sistemu.

DRAFT VERZIJA

Ograničenja (6) i (7) dodeljuju svakoj liniji specifičan kapacitet baterije, koji mora biti isti u oba smera. Energetski bilans modelira se praćenjem potrošnje energije, pri čemu ograničenja (8) povezuju nivo napunjenosti baterije između stajališta, uključujući potrošnju i rekuperaciju tokom kretanja autobusa. Ograničenja (9) i (10) definišu raspoloživu energiju na početku i na kraju svakog poluobrta, dok (11) obezbeđuje dovoljno energije za povratak do autobaze uz poštovanje minimalnog praga napunjenosti. Ograničenja (12) i (13) određuju ukupne energetske potrebe i ukupan kapacitet punjača za svaku autobazu. Ograničenjima (14) definisano je maksimalno vreme snabdevanja e-autobusa električnom energijom, a ograničenja (15) i (16) definišu binarne i nenegativne promenljive u modelu.

3. PRIMENA BEM MODELA

Za testiranje BEM modela odabrana je i razmatrana mreža linija JGTP u Beogradu koju čine autobuske linije 25, 26, 30 i 44, koje se međusobno ukrštaju i delimično preklapaju (što je prikazano na slici). Za analizu modela razmatrane su tri opcije sporih punjača, koji se postavljaju u autobazama, snaga 40 kW, 80 kW i 150 kW, čiji troškovi nabavke iznose 30.000 €, 50.000 € i 80.000 €, gledano tim redom [9, 14, 15]. Snabdevanje električnom energijom se vrši tokom noći, u periodu između ponoći i četiri časa ujutru, jer se gradski autobusi u Beogradu nalaze i do 20 sati dnevno u eksploataciji. Pripadnost linija autobazama u ovom radu nije u skladu sa realnim stanjem, što ne utiče na testiranje modela. Očekivani eksploatacioni vek punjača je u literaturi između 20 [2] i 30 godina [16], dok je eksploatacioni vek e-autobusa oko 12 godina [11]. U radu je usvojen eksploatacioni vek punjača od 24 godine. Kako bi dimenzionisane snage i broj punjača zadovoljili zahteve za električnom energijom i u danima sa vršnim opterećenjima, potrošnja energije je računata pomoću simulacionog softvera IGNITE [19] u merodavnim danima (utorak – četvrtak), za periode vršnih časova (15-17 h) i najveću dozvoljenu masu vozila od 18.000 kg. Eksploatacioni vek LFP baterija je izračunat na osnovu modela za proračun degradacije baterije tokom rada/eksploatacije [12, 17], kao i degradacije baterije tokom stajanja (tzv. kalendarska degradacija) [18]. Primenom ovih modela dobijen je očekivani eksploatacioni vek LFP baterija za svaku od posmatranih linija, pri čemu je degradacija baterija modelovana za 20% manju potrošnju od vršnog scenarija kako bi se izbeglo predimenzionisanje troškova nabavke baterija (Tabela 2). Model definiše i kapacitet LFP baterija pod pretpostavkom homogenosti baterija po liniji. Cena baterija je oko 500 €/kWh, a razmatrani kapaciteti su 400, 500 i 600 kWh (Dmax), uz minimalni nivo napunjenosti (Dmin) od 20%. U tom smislu, troškovi baterija kreću se od 200.000 € do 300.000 €. Cena e-autobusa bez baterije iznosi oko 360.000 € [14]. Troškovi e-autobusa i baterija se analiziraju odvojeno zbog razlike u njihovom eksploatacionom veku i mogućnosti uobičajene agregatne zamene baterije nakon njihove potpune degradacije.

Tabela 2. Degradacija baterije u zavisnosti od kapaciteta LFP baterije za razmatrane linije

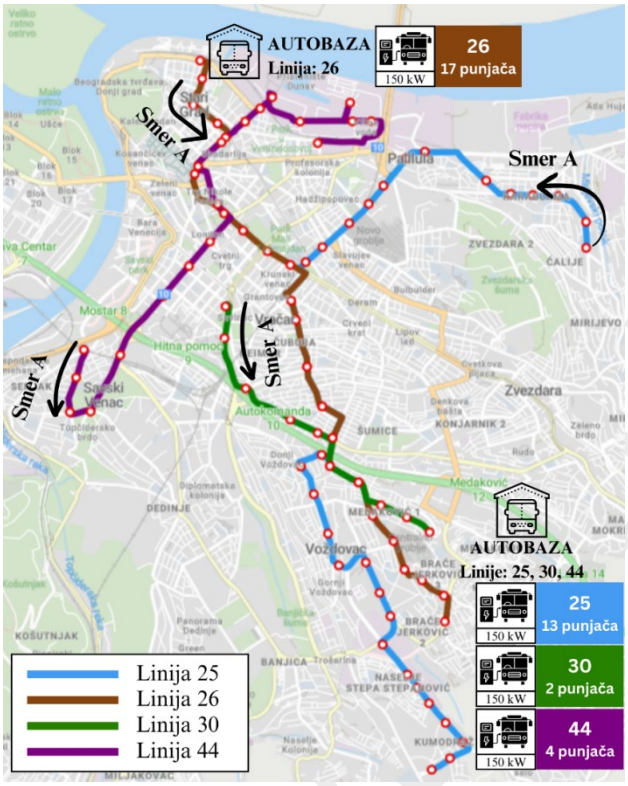
	Kapacitet LFP baterije [kWh]		
	400	**500**	**600**
Linija	Degradacija do 80% inicijalnog kapaciteta LFP baterije [godina]		
25	-	5	5,8
26	4,9	6,1	7
30	5,3	6,5	7,4
44	-	5,1	5,9

Za rešavanje definisanog problema korišćen je CPLEX na računaru sa Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 0, sa 64 GB RAM-a i brzinom od 2,00 GHz. Optimalno rešenje pronađeno je za nekoliko sekundi i ono podrazumeva postavljanje ukupno 36 punjača snage od po 150 kW. Ukupni troškovi postavljanja punjača iznose oko 3.420.000 €. Konkretno, u jednoj autobazi je planirano 13, 2 i 4 punjača za e-autobuse sa linija 25, 30 i 44, dok je u drugoj autobazi predviđeno 17 punjača za e-autobuse sa linije 26. Ovaj broj punjača zadovoljava potrebe e-autobusa za električnom energijom i u danima najvećeg opterećenja, a svakako će zadovoljiti potrebe i u danima sa manjim opterećenjem. Rezultati pokazuju da su na linijama 25 i 44 potrebne LPF baterije kapaciteta 600 kWh, na liniji 26 kapaciteta 500 kWh, a na liniji 30 - 400 kWh. Inicijalni troškovi nabavke 46 e-autobusa iznose oko 28.810.000 €, dok ukupni troškovi implementacije za eksploatacioni vek od 24 godine prelaze 86.107.000 €.

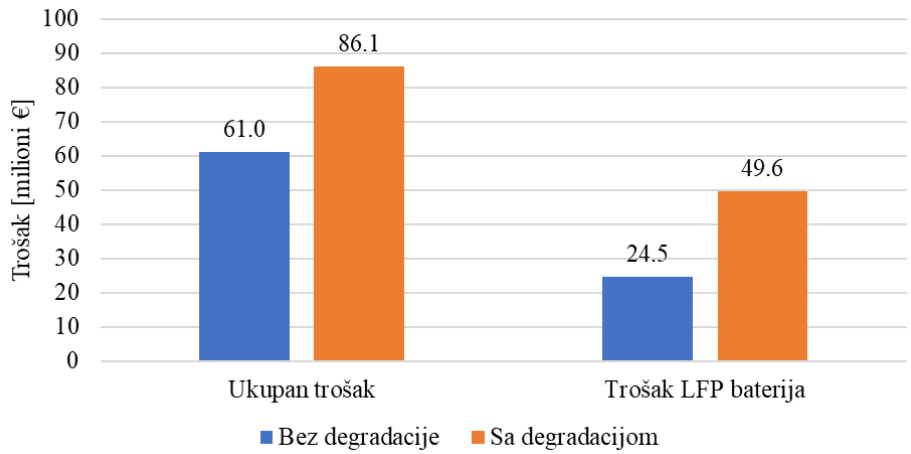
Na slici prikazani su ukupni troškovi i troškovi LFP baterija za implementaciju e-autobusa u dva scenarija: sa degradacijom i bez degradacije baterije. Rezultati pokazuju da ukupni trošak za period od 24 godine iznosi 61 milion evra bez posmatranja degradacije baterije, dok sa uračunatom degradacijom raste za

DRAFT VERSION

41,15% i dostiže 86,1 milion evra. Jasno je da ignorisanje degradacije dovodi do značajnog potcenjivanja investicionih troškova, naglašavajući važnost uključivanja ovih efekata u fazi planiranja kako bi se obezbedile realistične i održive procene efekata elektrifikacije JGTP.



Slika 1. Prikaz razmatranih linija, pripadajućih autobaza i broj punjača koji se u njima nalaze



Slika 2. Ukupni troškovi implementacije e-autobusa (levo) i troškovi nabavke LFP baterija u posmatranom periodu (desno) sa i bez uračunavanja troškova degradacije baterija

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je BEM model za elektrifikaciju linija JGTP koji vrši optimizaciju infrastrukture punjača i kapaciteta LFP baterija minimizirajući ukupne investicione troškove. Ovaj model, uključivanjem u razmatranje degradacije baterija, omogućava realniju procenu investicionih troškova, što doprinosi održivoj i ekonomičnoj elektrifikaciji sistema JGTP. Rezultati ukazuju da zanemarivanje ovog faktora može dovesti do značajnog potcenjivanja ukupnih troškova (za preko 40%), kao što je pokazano na testiranom primeru.

Jedan od pravaca budućih istraživanja podrazumeva proširenje modela dodatnim ograničenjima koja će omogućiti uključivanje i autobuskih stajališta kao potencijalnih lokacija za postavljanje punjača. Ovo

unapređenje modela ima za ideju da omogući razmatranje različitih koncepcija punjenja, a samim tim i korišćenje različitih vrsta baterija u e-autobusima. Takođe, među pravcima budućih istraživanja izdvaja se i primena dinamičkih modela za proračun degradacije baterija što bi model dodatno prilagodilo realnim uslovima eksploatacije.

LITERATURA

He, Y., et al., Optimal Charging Scheduling And Management For A Fast-Charging Battery Electric Bus System, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, *142* (2020), pp. 102056

Lotfi, M., et al., Optimizing Charging Infrastructures of Electric Bus Routes to Minimize Total Ownership Cost, *Proceedings*, 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 2020, Vol. 029803, pp. 1-6

Lin, Y., et al., Charging Network Planning For Electric Bus Cities: A Case Study Of Shenzhen, China, *Sustainability*, *11* (2019), 17, pp. 4713

Rogge, M., et al., Electric Bus Fleet Size And Mix Problem With Optimization Of Charging Infrastructure, *Appl. Energy*, *211* (2018), pp. 282-295

Stumpe, M., et al., Study On Sensitivity Of Electric Bus Systems Under Simultaneous Optimization Of Charging Infrastructure And Vehicle Schedules, *EURO J. Transp. Logist.*, *10* (2021), pp. 100049

Bao, Z., et al., An Optimal Charging Scheduling Model And Algorithm For Electric Buses, *Appl. Energy*, *332* (2023), pp. 120512

Wang, Y., et al., Integrated Optimization Of Charger Deployment And Fleet Scheduling For Battery Electric Buses, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, *109* (2022), pp. 103382

Su, X., et al., Design Of Electric Bus Transit Routes With Charging Stations Under Demand Uncertainty, *Energies*, *16* (2023), 4, pp. 1848

Tzamakos, D., et al., Electric Bus Charging Station Location Optimization Considering Queues, *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, *12* (2023), 1, pp. 291-300

Liu, Z., et al., Planning Of Fast-Charging Stations For A Battery Electric Bus System Under Energy Consumption Uncertainty, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, *2672* (2018), 8, pp. 96-107

Zhang, L., et al., On The Role Of Battery Capacity Fading Mechanism In The Lifecycle Cost Of Electric Bus Fleet, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, *22* (2021), 4, pp. 2371-2380

Chen, L., et al., A Configuration-Control Integrated Strategy For Electric Bus Charging Station With Echelon Battery System, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, *56* (2020), 5, pp. 6019-6028

Zhang, L., et al., Optimal Electric Bus Fleet Scheduling Considering Battery Degradation And Non-Linear Charging Profile, *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, *154* (2021), pp. 102445

Mišanović, S.M., Energy and environmental performance of buses on the electrical drive in the passenger transport system - Doctoral Dissertation (In Serbian), Ph. D. thesis, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, 2020

He, Y., et al., Fast-Charging Station Deployment For Battery Electric Bus Systems Considering Electricity Demand Charges, *Sustain. Cities Soc.*, *48* (2019), April, pp. 101530

Hu, H., et al., A Joint Optimisation Model For Charger Locating And Electric Bus Charging Scheduling Considering Opportunity Fast Charging And Uncertainties, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, *141* (2022), May, pp. 103732

Farzin, H., et al., A Practical Scheme To Involve Degradation Cost Of Lithium-Ion Batteries In Vehicle-To-Grid Applications, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, *7* (2016), 4, pp. 1730-1738

Hu, X., et al., Battery Lifetime Prognostics, *Joule*, *4* (2020), 2, pp. 310-346

Realis, IGNITE simulation software, https://www.realis-simulation.com/products/ignite/

ARHIVERIJA

SIMULACIJA I STOHASTIČKI MODELI

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

SIMULACIONA ANALIZA UTICAJA UPRAVLJAČKIH FAKTORA NA PERFORMANSE VIŠEFAZNOG PROIZVODNOG SISTEMA POD POLCA KONTROLOM

SIMULATION ANALYSIS OF THE IMPACT OF CONTROL FACTORS ON THE PERFORMANCE OF A MULTI-STAGE PRODUCTION SYSTEM UNDER POLCA CONTROL

NEMANJA TULIMIROVIĆ[1], IVAN TOMAŠEVIĆ[2], MARIJA ĆIRIĆ[3], DRAGOSLAV SLOVIĆ[4]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, nemanja.tulimirovic@fon.bg.ac.rs, 0009-0008-9722-6108
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, ivan.tomasevic@fon.bg.ac.rs, 0000-0003-4416-9695
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, marijaciric20@gmail.com,
[4] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, dragoslav.slovic@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-7803-6466

Rezime: *Ovaj rad analizira dvofazni proizvodni sistem koji se odlikuje proizvodnjom širokog asortimana u malim obimima (High-Mix Low-Volume, HMLV), pod kontrolom POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) sistema za upravljanje materijalnim tokom. Simulacija je korišćena u cilju analize uticaja četiri pravila prioritizacije poslova i dva tipa POLCA kartica na četiri performanse sistema pri šest različitih nivoa zaliha nedovršene proizvodnje (Work-In-Progress, WIP). Rezultati pokazuju da pravila prioritizacije imaju značajan uticaj na performanse: pravilo SPT (Shortest Processing Time) minimizuje vremena ciklusa, ali dovodi do većih kašnjenja dužih porudžbina. ERD (Earliest Release Date) i MERD (Modified Earliest Release Date) pružaju bolji balans između efikasnosti i tačnosti isporuka, dok FCFS (First-Come-First-Served) daje stabilne, ali prosečne rezultate. Tip POLCA kartice po jedinici uglavnom ostvaruje bolje rezultate u pogledu ukupnog vremena ciklusa i procenta kašnjenja. Povećanje WIP-a generalno poboljšava performanse do određene granice, nakon koje efekti i razlike kod određenih mera postaju manje izražene. Sa stanovišta praktične primene, strategija upravljanja treba biti usklađena sa operativnim ciljevima i karakteristikama proizvodnog sistema, uz odabir one kombinacije pravila, tipa POLCA kartice i nivoa WIP-a koja najviše odgovara zahtevima posmatranog sistema.*

Ključne reči: *POLCA, simulacija diskretnih događaja, proizvodnja, HMLV.*

Abstract: *This paper analyzes a two-stage production system within a High-Mix Low-Volume (HMLV) environment, controlled using the POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) system for material flow management. Simulation is used to examine the impact of four job prioritization rules and two types of POLCA cards on four system performance measures across six different WIP (Work-In-Progress) levels. Results show that prioritization rules significantly affect performance: SPT (Shortest Processing Time) minimizes cycle times but increases delays for longer jobs. ERD (Earliest Release Date) and MERD (Modified ERD) provide a better balance between efficiency and due-date adherence, while FCFS (First-Come-First-Served) yields stable but average results. Unit-based POLCA cards generally outperform load-based ones in terms of cycle time and tardiness. Increasing WIP improves performance up to a point, beyond which the gains diminish. In practice, the choice of rule, card type, and WIP level should align with the system's operational goals and characteristics.*

Keywords: *POLCA, Discrete-Event Simulation, manufacturing, HMLV.*

1. UVOD

Savremeni proizvodni sistemi koji posluju u okviru HMLV okruženja suočavaju se sa sve većim izazovima u pogledu fleksibilnosti, efikasnosti i tačnosti isporuka. Kao odgovor, posebnu pažnju privlače *pull* pristupi koordinacije i kontrole materijalnog toka, koji kroz regulaciju zaliha nedovršene proizvodnje omogućavaju efikasnost i otpornost sistema na varijacije. POLCA predstavlja *pull* sistem kontrole materijalnog toka razvijen u okviru *Quick Response Manufacturing* pristupa, sa ciljem primarne primene u

RADNA VERZIJA

HMLV okruženjima (Riezebos, 2010; Suri, 1998). Zbog mogućnosti lokalne kontrole WIP-a i prilagođavanja kapaciteta stvarnim uslovima u proizvodnji, POLCA se navodi kao efikasna alternativa upravljanja materijalnim tokom (Thürer et al., 2017, 2019; Vandaele et al., 2008). Pri primeni POLCA sistema, posebnu pažnju treba posvetiti izboru pravila prioritizacije poslova, jer odabir odgovarajućeg pravila može imati značajan uticaj na performanse posmatranog sistema (Carmo-Silva et al., 2020; Fernandes et al., 2017; Thürer et al., 2017, 2019). Ipak, većina postojećih istraživanja usmerena je na jednofazne konfiguracije sistema, dok primena POLCA u složenijim sistemima ostaje manje istražena. Kao rezultat, nameće se pitanje kakve rezultate POLCA ostvaruje u višefaznim sistemima, gde su tokovi materijala međuzavisni, a koordinacija između proizvodnje i montaže znatno zahtevnija (Thürer et al., 2013; Fernandes et al., 2020). Shodno tome, u ovom radu se analizira dvofazni proizvodni sistem pod POLCA kontrolom materijalnog toka. Postavljena su sledeća istraživačka pitanja:

- Kako bi se sistem ponašao pri primeni naprednijih pravila odlučivanja o dodeli POLCA kartica i izboru poslova za obradu (pravila prioritizacije poslova) u fazi montaže?
- Kakav je uticaj tipa POLCA kartice i tih pravila, pri različitim nivoima WIP-a, na performanse sistema?

U cilju dobijanja odgovora na ova pitanja, sproveden je simulacioni eksperiment kojim se kvantitativno ispituje kombinovani uticaj navedenih upravljačkih faktora (pravila prioritizacije, tipa POLCA kartice i nivoa WIP) na performanse dvofaznog POLCA proizvodnog sistema. Dalja struktura rada je sledeća: u poglavlju 2 prikazan je teorijski okvir kroz pregled relevantne literature. Poglavlje 3 pruža opis proizvodnog sistema i simulacionog eksperimenta. U poglavlju 4 analizirani su dobijeni rezultati. Konačno, poglavlje 5 sumira zaključke, praktične implikacije i predlaže pravce daljih istraživanja.

2. TEORIJSKI OKVIR

Većina simulacionih istraživanja o POLCA kontroli sprovedena je u jednostavnim jednofaznim proizvodnim sistemima koji pretpostavljaju snabdevenost radnih stanica svim potrebnim materijalima i delovima (Carmo-Silva et al., 2020; Riezebos, 2010; Thürer et al., 2017, 2019; Vandaele et al., 2008). Takvi modeli, iako korisni za razumevanje ponašanja POLCA mehanizma kontrole, ne oslikavaju u potpunosti složenost HMLV sistema u kojima je proizvodnja često organizovana u više faza, sa jasno razdvojenim etapama proizvodnje delova i montaže. U tim uslovima, izazovi koordinacije i kontrole materijalnog toka postaju znatno izraženiji (Thürer et al., 2013), pa višefazne konfiguracije predstavljaju pogodan okvir za proučavanje i analizu POLCA pristupa. U tom pravcu, Fernandes et al. (2020) proširuju model predložen od strane Thürer et al. (2019) i analiziraju dvofazni sistem pod POLCA kontrolom, poredeći ga sa *Immediate Release* pristupom. Međutim, analiza je ograničena na jednostavno FCFS pravilo, primenjeno kroz integrisano odlučivanje, gde se se dodela kartica i izbor posla za obradu obavljaju istovremeno, u trenutku kada stanica postane slobodna.

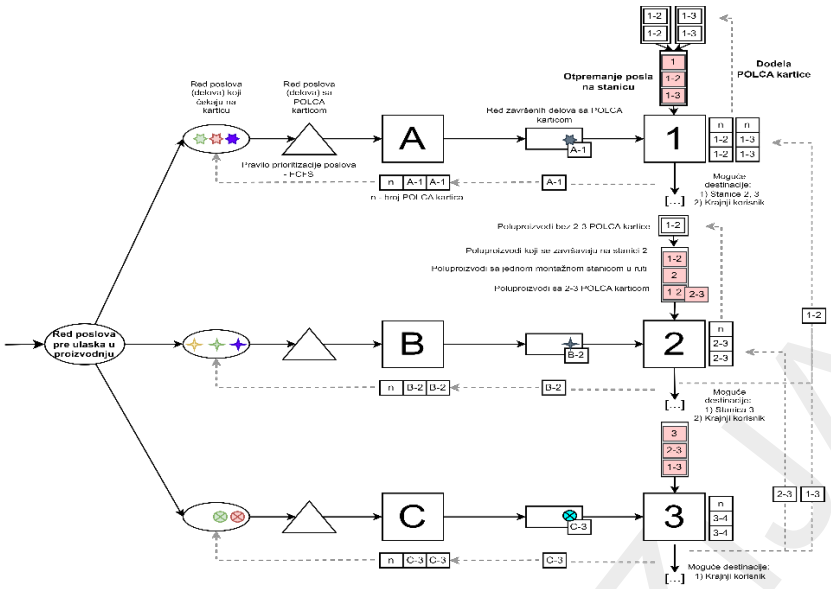
3. SIMULACIONI MODEL

U ovom poglavlju opisan je simulacioni model proizvodnog sistema pod POLCA kontrolom, uključujući njegovu strukturu, postavke simulacionog eksperimenta i mere performansi.

3.1. Opis proizvodnog sistema

Proizvodni sistem obuhvata dve faze: proizvodnju (stanice A, B, C) i montažu (stanice 1, 2, 3), pri čemu svaka proizvodna stanica opslužuje tačno jednu montažnu stanicu time formirajući parove: A–1, B–2, i C–3. Montažna faza predstavlja *general flow shop* sistem sa usmerenim tokom i mogućnošću preskakanja stanica. Po dolasku posla u sistem, unapred se određuju njegova ruta u fazi montaže, vremena obrade na svim stanicama, zahtevani rok završetka i podskup delova koje je potrebno proizvesti na odgovarajućim proizvodnim stanicama. POLCA se koristi za kontrolu i koordinaciju toka između proizvodnih i montažnih stanica, kao i između montažnih stanica. U sistemu postoji ukupno šest POLCA petlji a maksimalni dozvoljeni nivo WIP u svakoj petlji određen je brojem POLCA kartica. Za početak proizvodnje dela na proizvodnoj stanici, potrebna je dostupnost odgovarajuće POLCA kartice (npr. A-1 za proizvodnju na stanici A). Deo se nakon proizvodnje šalje na zalihe delova ispred odgovarajuće montažne stanice, a kartica se oslobađa tek nakon ugradnje tog dela na montažnoj stanici. Kada se proizvede deo koji je potreban za prvu montažnu stanicu u ruti proizvoda, posao se pušta u fazu montaže i inicira se zahtev za odgovarajućom POLCA karticom koja omogućava njegov ulazak na tu stanicu. Nakon što posao dobije karticu i stanica postane slobodna, započinje operacija montaže. Kartice između montažnih stanica oslobađaju se nakon završetka montaže na narednoj stanici u ruti posla. Detaljan prikaz sistema dat je na Slici 1.

DRAFT VERZIJA



Slika 1: Grafički prikaz proizvodnog sistema

3.2. Tipovi POLCA kartica i pravila prioritizacije poslova u fazi montaže

U modelu su analizirana dva tipa POLCA kartica: (a) POLCA kartice po jedinici (tzv. *unit-based* POLCA) gde svaka kartica predstavlja jedan posao, bez obzira na dužinu ili složenost obrade, i (b) POLCA kartice po opterećenju (tzv. *load-based* POLCA) gde jedna kartica odgovara opterećenju izraženom kao vreme obrade na sledećoj stanici u ruti posla.

Dodela POLCA kartice i izbor posla za obradu na radnoj stanici sprovode se kao dve nezavisne odluke. Posebno se odlučuje kom poslu će biti dodeljena slobodna POLCA kartica, a potom se nakon oslobađanja radne stanice, između poslova koji već poseduju karticu odlučuje koji će imati prioritet obrade. U oba slučaja koristi se isto pravilo prioritizacije. Primenjena pravila su FCFS, SPT, ERD i MERD. Pravilo FCFS daje prioritet poslu koji je najduže čekao. U fazi proizvodnje se uvek primenjuje FCFS pravilo, nezavisno od pravila koje se koristi u fazi montaže. Pravilo SPT daje prednost poslu sa najkraćim vremenom obrade. Kod dodele kartica gleda se vreme obrade na narednoj stanici u ruti posla. Kod redosleda obrade gleda se vreme obrade na tekućoj stanici. Pravilo ERD daje prednost poslu čiji je planirani datum puštanja u obradu (ERD) najraniji. U ovom modelu, ERD posla za svaku montažnu stanicu procenjuje se tako što se od roka završetka posla oduzima suma planiranih vremena obrade na svim narednim montažnim stanicama kroz koje posao tek treba da prođe. Time se dobija najraniji trenutak kada bi posao trebao da započne obradu na tekućoj stanici kako bi završio na vreme. ERD se u ovom modelu koristi isključivo kao pravilo za određivanje prioriteta, bez stvarnog odlaganja obrade do tog trenutka, budući da je pokazano da takvo čekanje može negativno uticati na performanse sistema (Thürer et al., 2019). Kod pravila MERD poslovi se najpre razvrstavaju u dve grupe: (1) poslovi kojima je istekao ERD, koje se smatraju hitnim, i (2) poslovi kojima ERD još nije istekao. Prednost imaju hitni poslovi, koje se dalje rangiraju prema pravilu SPT. Ukoliko nema hitnih poslova, rangiranje se vrši među manje hitnim poslovima prema ERD pravilu. Kod POLCA kartica po opterećenju, pri dodeli kartica se najpre izdvajaju poslovi čije vreme obrade na narednoj stanici ne prelazi raspoloživi kapacitet (izuzetak je FCFS pravilo), a zatim se primenjuje odgovarajuće pravilo prioritizacije. Ovo filtriranje se ne primenjuje kod kartica po jedinici, jer svaka kartica predstavlja jedan posao.

3.3. Postavke simulacionog eksperimenta i mere performansi

Vreme između dolaska poslova u sistem podleže eksponencijalnoj raspodeli sa prosečnom vrednošću od 0,634 jedinice vremena, što obezbeđuje prosečan stepen iskorišćenosti radnih stanica od 90%. Vremena trajanja operacija proizvodnje i montaže podležu skraćenoj Erlangovoj raspodeli drugog reda, sa prosečnom vrednošću od 1 i maksimalnom vrednošću od 4 jedinice vremena. U vremena trajanja operacije uključeno je i vreme podešavanja stanice, dok se vreme transporta zanemaruje u skladu sa standardnom praksom u sličnim simulacionim radovima. Svakom poslu se po dolasku u sistem nasumično dodeljuje ruta u fazi montaže montaže iz skupa: {(1), (2), (3), (1, 2), (1, 3), (1, 2, 3)}. Zahtevani rok isporuke određuje se dodavanjem vremenskog dodatka, koji predstavlja slučajnu promenljivu uniformno raspoređenu između 35 i 50 jedinica vremena, na vremenski trenutak dolaska posla u sistem. Radi ispitivanja uticaja različitih pristupa

DRAFT VERZIJA

upravljanju na mere performansi, posmatrani su efekti tri upravljačka faktora: (i) dva tipa POLCA kartica (po jedinici ili prema radnom opterećenju), (ii) šest nivoa WIP u svakoj POLCA petlji, izražen u jedinicama dostupnih kartica (sa vrednostima 18, 20, 22, 24, 26, i 28) i (iii) četiri pravila prioritizacije poslova u fazi montaže (FCFS, SPT, ERD, i MERD). U pitanju je potpun faktorski dizajn sa 2 × 6 × 4 jedinstvenih kombinacija faktora tj. 48 scenarija. Svaki scenario simuliran je kroz 100 nezavisnih replikacija radi smanjenja uticaja stohastičkih odstupanja i obezbeđivanja statističke pouzdanosti rezultata. Svaka replikacija trajala je 40.000 jedinica vremena, pri čemu je prvih 4.000 jedinica tretirano kao period stabilizacije sistema (*warm-up period*), a prikupljanje rezultata vršeno je u preostalom delu vremena. Na kraju simulacije, izračunati su prosečni rezultati za svaki scenario. Za analizu performansi sistema korišćena su četiri pokazatelja: (i) prosečno ukupno vreme ciklusa (*Mean Total Throughput Time* - MTT), (ii) prosečno vreme ciklusa montaže (*Mean Assembly Throughput Time* - MAT), (iii) procenat zakasnelih porudžbina (*Percentage of Tardy Orders* - PTO) i (iv) prosečno vreme kašnjenja (*Mean Tardiness* - MTD). Za razliku od drugih sličnih simulacionih studija u kojima je pokazatelj (ii) korišćen kao pomoćna mera (Fernandes et al., 2020), u ovom radu posmatra se kao glavna mera performansi jer omogućava izolovano posmatranje efikasnosti faze montaže, čime se preciznije identifikuje uticaj faktora na drugu fazu proizvodnog sistema.

3.4. Programska realizacija simulacionog modela

Simulacioni model je razvijen u programskom jeziku *Python* korišćenjem *SimPy* biblioteke za simulaciju diskretnih događaja. Implementiran je kroz objektno-orijentisani pristup sa tri glavne klase: (1) *POLCAConfig* koja definiše parametre simulacije (prosečno vreme između dolaska poslova, trajanje simulacije, nivo WIP, tip POLCA kartice i pravilo prioritizacije); (2) *Order* koja definiše poslove i čuva njihove atribute (rutu, vremena obrade na svim stanicama, zahtevani rok isporuke, ERD, trenutak dolaska i završetka posla, itd.); i (3) glavne klase *POLCASimulator* koja inicijalizuje simulaciono okruženje (*simpy.Environment*), proizvodne (*simpy.Resource*) i montažne stanice (*simpy.PriorityResource*) kao i POLCA petlje i nivoe raspoloživih kartica. Ova klasa sadrži glavne procese realizovane kroz metode: *source()* za generisanje poslova, *part_proc()* za obradu delova u proizvodnji i *order_proc()* za montažni proces. Pored toga, uključuje i pomoćne metode: *allocate()* za dodelu kartica uz primenu zadatog pravila prioritizacije, *need_load()* za određivanja radnog opterećenja shodno tipu POLCA kartice, *compute_erd()* za izračunavanje vrednosti ERD, *run()* za pokretanje simulacije i *report()* prikupljanje rezultata. Klasa *POLCASimulator* koristi parametre definisane u *POLCAConfig* i upravlja tokom svih poslova (instanci klase *Order*) kroz sistem, uključujući njihovu obradu, dodelu POLCA kartica i prikupljanje rezultata.

4. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju analizirani su prikupljeni rezultati i statistička značajnost uticaja faktora na performanse sistema.

4.1. Efekti faktora i međusobne interakcije (ANOVA)

Za statističku analizu rezultata sprovedena je trofaktorska ANOVA kako bi se procenio uticaj faktora na mere performansi. Nivo značajnosti testa iznosio je $\alpha = 0,05$. Rezultati su prikazani u Tabeli 1.

Tabela 1: ANOVA izveštaj

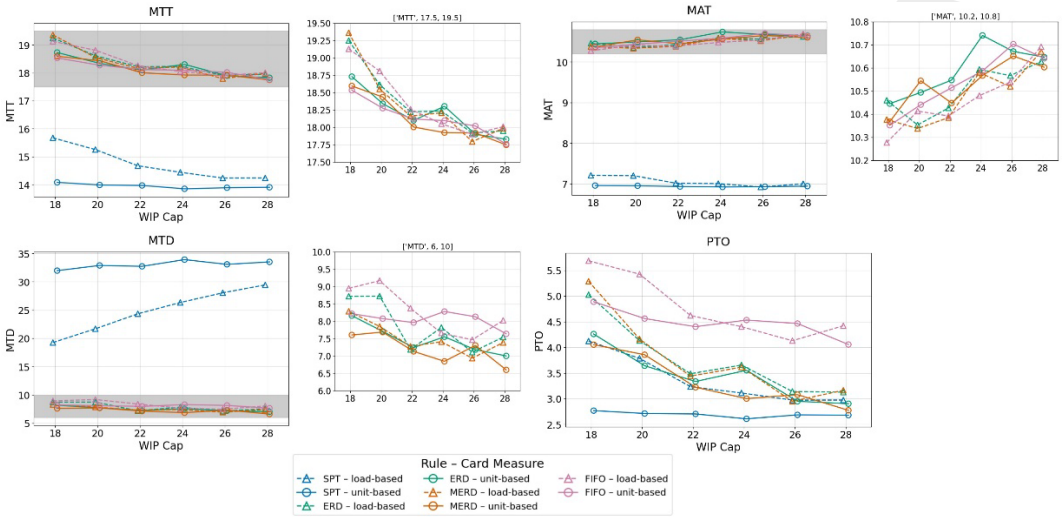
	Source of variance	*Sum of Squares*	*df*	*F*	*p-value*
Mean Total Throughput Time (MTT)	C(rule)	13628,26	3	4446,44	0,00
	C(card_measure)	152,58	1	149,35	0,00
	C(wip_cap)	583,41	5	114,21	0,00
	C(rule):C(card_measure)	79,82	3	26,04	0,00
	C(rule):C(wip_cap)	16,69	15	1,09	0,36
	C(card_measure):C(wip_cap)	89,48	5	17,52	0,00
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	29,55	15	1,93	0,02
	Residual	4844,71	4742		
Mean Assembly Throughput Time (MAT)	C(rule)	11098,50	3	15453,95	0,00
	C(card_measure)	0,67	1	2,80	0,09
	C(wip_cap)	20,00	5	16,71	0,00
	C(rule):C(card_measure)	8,27	3	11,51	0,00
	C(rule):C(wip_cap)	23,99	15	6,68	0,00
	C(card_measure):C(wip_cap)	3,34	5	2,79	0,02
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	4,68	15	1,30	0,19
	Residual	1135,18	4742		
Percentage of Tardy Orders (PTO)	C(rule)	1614,85	3	226,46	0,00
	C(card_measure)	222,28	1	93,52	0,00
	C(wip_cap)	926,47	5	77,96	0,00
	C(rule):C(card_measure)	26,56	3	3,73	0,01
	C(rule):C(wip_cap)	118,20	15	3,32	0,00
	C(card_measure):C(wip_cap)	134,37	5	11,31	0,00
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	40,55	15	1,14	0,32
	Residual	11271,28	4742		
Mean Tardiness (MTD)	C(rule)	405121,40	3	16862,92	0,00
	C(card_measure)	3843,57	1	479,96	0,00
	C(wip_cap)	300,35	5	7,50	0,00
	C(rule):C(card_measure)	15993,87	3	665,73	0,00
	C(rule):C(wip_cap)	5041,41	15	41,97	0,00
	C(card_measure):C(wip_cap)	498,53	5	12,45	0,00
	C(rule):C(card_measure):C(wip_cap)	2535,17	15	21,10	0,00
	Residual	37974,55	4742		

DRAFT VERZIJA

Rezultati ANOVA testa pokazuju da skoro svi glavni faktori imaju statistički značajan uticaj na sve mere performansi. Izuzetak je uticaj tipa POLCA kartice na MAT, čiji efekat nije statistički značajan. Pored pojedinačnih uticaja, značajna je i većina dvofaktorskih interakcija, naročito između pravila i tipa POLCA kartice, kao i pravila i nivoa WIP-a. Trofaktorska interakcija značajna je kod MTT i MTD, što sugeriše da se kod ovih mera istovremeno mora razmatrati kombinovani uticaj svih faktora.

4.2 Analiza glavnih trendova i uticaja faktora na performanse

Grafički prikazi na Slici 2 ilustruju promene performansi sistema u zavisnosti od nivoa WIP-a, pri čemu su prikazane sve kombinacije pravila prioritizacije i tipova POLCA kartica.



Slika 2: Prosečni rezultati po merama performansi

Pravila prioritizacije: Pravila prioritizacije u fazi montaže imaju značajan uticaj na sve performanse sistema. Primena SPT pravila dovodi do najnižih vrednosti MTT i MAT, što ukazuje na visoku efikasnost sistema, pogotovo u kombinaciji sa POLCA karticama po jedinici. Međutim, zanemarivanje rokova rezultira visokim vrednostima MTD, usled čestog odlaganja poslova sa dužim vremenima obrade, uprkos tome što PTO ostaje nizak. Nasuprot tome, ERD i MERD omogućavaju bolju kontrolu kašnjenja, pri čemu MERD dodatno daje prednost hitnim poslovima, smanjujući verovatnoću da budu potisnuti u redovima od strane manje hitnih naloga. Efekti ovih pravila postaju posebno izraženi pri višim nivoima WIP-a, gde uspešno ostvaruju balans između efikasnosti, tačnosti isporuka i prosečnog kašnjenja. Pravilo FCFS, iako konceptualno najjednostavnije, daje stabilne ali prosečne rezultate u svim merama. Ne favorizuje ni kratke ni hitne poslove, čime doprinosi ujednačenosti tretmana, ali bez optimizacije bilo koje mere performansi.

Tip POLCA kartice: POLCA kartice po jedinici omogućavaju brži ulazak porudžbina u sistem što se odražava kroz niže vrednosti MTT, PTO i MTD u odnosu na POLCA kartice po opterećenju. S druge strane kartice po opterećenju uvode precizniju kontrolu kapaciteta, jer veliki poslovi zahtevaju više raspoloživog kapaciteta. U takvim situacijama, mali poslovi brže dolaze na red, dok se veliki nalozi akumuliraju i čekaju, što povećava verovatnoću za kašnjenjem i produžava ukupno vreme prolaska kroz sistem, naročito pri nižim nivoima WIP. Efekat ovakvog "zagušenja" vidljiv je kod FCFS pravila u kombinaciji sa POLCA karticama po opterećenju, gde se visoke vrednosti MTD i PTO jasno uočavaju. Izuzetak je SPT pravilo u kombinaciji sa karticama po jedinici, koje pri povećanju WIP-a dovodi do rasta MTD. Ovaj efekat posledica je sve veće dominacije kratkih poslova u redovima, usled čega duži nalozi ostaju blokirani i akumuliraju kašnjenje. Kod kartica po opterećenju ovaj problem je delimično ublažen, jer sistem filtrira ulaz na osnovu trajanja obrade, što omogućava dugim porudžbinama da uđu u sistem tek kada zaista postoji raspoloživ kapacitet i brže dođu na red za obradu.

Nivo WIP: Povećanje broja dostupnih POLCA kartica u celini doprinosi poboljšanju performansi sistema. Vrednosti MTT, PTO i MTD opadaju sa rastom WIP-a, što je očekivano s obzirom na veću protočnost i manju verovatnoću čekanja na slobodne kartice. Pri višim nivoima WIP-a razlike između pravila postaju manje izražene i rezultati konvergiraju ka sličnim vrednostima. Izuzetak predstavljaju pravilo SPT, koje i dalje pokazuje niže vrednosti MTT, MAT i više vrednosti MTD, kao i pravilo FCFS, koje se izdvaja po vrednostima PTO. Kod većine pravila, vrednosti MAT rastu sa WIP-om, što ukazuje na veće zadržavanje u montažnoj fazi zbog povećane dužine redova, ali ne nužno i na degradaciju performansi sistema kao celine.

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirane su performanse dvofaznog proizvodnog sistema pod POLCA kontrolom. Na taj način proširen je opseg dosadašnjih istraživanja POLCA sistema (Carmo-Silva et al., 2020; Riezebos, 2010; Thürer et al., 2017, 2019; Vandaele et al., 2008), koja su se pretežno fokusirala na jednostavne jednofazne konfiguracije ili su bila ograničena na jednostavna pravila prioritizacije poslova, poput integrisanog FCFS pravila (Fernandes et al., 2020). Uvođenjem tri dodatna pravila prioritizacije (SPT, ERD, MERD) i tretiranjem dodele POLCA kartice i izbora posla za obradu kao dve odvojene odluke, složenost sistema je dodatno povećana. Postavljena su sledeća istraživačka pitanja: (1) Kako bi se sistem ponašao pri primeni naprednijih pravila odlučivanja o dodeli POLCA kartica i izboru poslova (pravila prioritizacije poslova) za obradu u fazi montaže? (2) Kakav je uticaj tipa POLCA kartice i tih pravila, pri različitim nivoima WIP-a, na performanse sistema?

Rezultati simulacije pokazuju da izbor pravila značajano utiče na performanse sistema. Pravilo SPT daje ubedljivo najniža vremena ciklusa, ali uz veća kašnjenja manjeg broja porudžbina sa dužim vremenom obrade. Stoga, SPT se preporučuje za okruženja gde je brzina protoka prioritet. Nasuprot tome, pravila ERD i MERD postižu bolji balans između efikasnosti i tačnosti isporuka, posebno pri visokom WIP-u, što ih čini pogodnim za sisteme osetljive na kašnjenja i fokusirane na zadovoljstvo kupaca. Pravilo FCFS može biti jednostavna opcija za sisteme gde se očekuje ravnomeran tretman porudžbina i veća otpornost na varijacije. Tip POLCA kartice, u kombinaciji sa pravilima prioritizacije, ostvaruje značajan uticaj na performanse, pri čemu kartice po jedinici, u većini scenarija, rezultiraju nižim ukupnim vremenom ciklusa i manjim procentom kašnjenja u odnosu na kartice po opterećenju. Povećanje broja dostupnih kartica (WIP) u većini slučajeva dovodi do poboljšanja performansi. Međutim, kako se WIP približava najvišim nivoima, razlike između pravila postaju manje izražene, uz izuzetak SPT pravila koje zadržava specifična odstupanja u vremenima ciklusa i kašnjenja. Imajući u vidu sve prethodno, zaključuje se da izbor strategije upravljanja treba prilagoditi operativnim ciljevima i karakteristikama sistema, uz uvažavanje međuzavisnosti između pravila, tipa kartice i nivoa WIP-a. Glavno ograničenje rada je oslanjanje na simulaciju idealizovanog proizvodnog sistema, pa je za validaciju rezultata neophodno sprovesti dodatna empirijska istraživanja. Budući rad može obuhvatiti proširenje modela na konfiguracije sa više faza sa većim brojem radnih stanica, ili drugačijom logikom toka materijala, kao poređenje sa drugim pristupima kontrole materijalnog toka.

LITERATURA

Carmo-Silva, S., Fernandes, N., Thürer, M., & Ferreira, L. P. (2020). Extending the POLCA production control system with centralized job release. Production, 30, e20190159. https://doi.org/10.1590/0103-6513.20190159

Fernandes, N. O., Thürer, M., Mirzaei, N., Ferreira, L. P., Silva, F. J. G., & Carmo-Silva, S. (2020). POLCA Control in Two-Stage Production Systems. Procedia Manufacturing, 51, 1491–1496. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.207

Fernandes, N. O., Thürer, M., Stevenson, M., & Carmo Silva, S. (2017). Load-Based POLCA: An Assessment of the Load Accounting Approach. In Á. Rocha, A. M. Correia, H. Adeli, L. P. Reis, & S. Costanzo (Eds.), Recent Advances in Information Systems and Technologies (Vol. 570, pp. 397–405). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56538-5_40

Riezebos, J. (2010). Design of POLCA material control systems. International Journal of Production Research, 48(5), 1455–1477. https://doi.org/10.1080/00207540802570677

Suri, R. (1998). Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times. Productivity Press.

Thürer, M., Fernandes, N. O., Carmo-Silva, S., & Stevenson, M. (2017). Improving performance in POLCA controlled high variety shops: An assessment by simulation. Journal of Manufacturing Systems, 44, 143–153. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.05.006

Thürer, M., Fernandes, N. O., Stevenson, M., Silva, C., & Carmo-Silva, S. (2019). POLC-A: An assessment of POLCA's authorization element. Journal of Intelligent Manufacturing, 30(6), 2435–2447. https://doi.org/10.1007/s10845-018-1402-2

Thürer, M., Stevenson, M., Silva, C., Land, M., & Filho, M. G. (2013). Workload control and order release in two-level multi-stage job shops: An assessment by simulation. International Journal of Production Research, 51(3), 869–882. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.676685

Vandaele, N., Van Nieuwenhuyse, I., Claerhout, D., & Cremmery, R. (2008). Load-Based POLCA: An Integrated Material Control System for Multiproduct, Multimachine Job Shops. Manufacturing & Service Operations Management, 10(2), 181–197. https://doi.org/10.1287/msom.1070.0174

DRAFT VERSION

STATISTIČKI MODELI

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

ФЕНОМЕН ПРВЕ ЦИФРЕ И ИЗБОРНА ФОРЕНЗИКА: ПАРЛАМЕНТАРНИ ИЗБОРИ У СРБИЈИ 2012–2023.

FIRST DIGIT PHENOMENON AND ELECTORAL FORENSICS: PARLIAMENTARY ELECTIONS IN SERBIA 2012–2023

РАЈКО БУКВИЋ[1]

[1] Географски институт „Јован Цвијић“ САНУ, Београд, r.bukvic@mail.ru, 0000-0001-6744-3912

Резиме: *Супротно интуитивном очекивању, цифре 1, 2, ..., 9 не појављују се као прве у вишецифреним бројевима којима се исказују квантитативне карактеристике разних природних (и друштвених) феномена с подједнаком вероватноћом. Ова чињеница, позната као закон прве цифре, показала се као користан аналитички инструмент у многим областима. У раду се илуструје њена примена у изборној форензици, у анализи могућих манипулација на изборима. Емпиријском анализом резултата по гласачким местима обухваћене су водеће изборне листе и показан распоред прве цифре на парламентарним изборима у Србији 2012–2023 године. Добијено је значајно одступање у односу на Бенфордов закон прве цифре. Додатна анализа методом регресије освојених процената гласова тих листа у односу на излазност потврдила је у већини случајева одступања у односу на резултате који се очекују на изборима без манипулација. Сви добијени резултати сугеришу потребу додатних форензичких анализа уз примену других метода како би се утврдило да ли је било изборних манипулација.*

Кључне речи: *прва цифра, Бенфордов закон, изборна форензика, парламентарни избори, Србија.*

Abstract: *Contrary to intuitive expectations, the digits 1, 2, ..., 9 do not appear as the first digits in multi-digit numbers that express quantitative characteristics of various natural (and social) phenomena with equal probability. This fact, known as the law of the first digit, has proven to be a useful analytical tool in many fields. The paper illustrates its application in electoral forensics, in the analysis of possible manipulations in elections. The empirical analysis of the results by polling station includes the leading electoral lists and shows the distribution of the first digit in the parliamentary elections in Serbia in 2012–2023. A significant deviation was obtained in relation to Benford's law of the first digit. Additional analysis using the regression method of the percentages of votes won by these lists in relation to the turnout confirmed in most cases the deviations in relation to the results expected in elections without manipulation. All the results obtained suggest the need for additional forensic analyses using other methods to determine whether there was electoral manipulation.*

Keywords: *first digit, Benford’s law, electoral forensics, parliamentary elections, Serbia.*

1. УВОД: О ЗАКОНУ ПРВЕ ЦИФРЕ

Насупрот интуитивном очекивању, цифре (1, ..., 9) не појављују се као прве у вишецифреним бројевима с подједнаком вероватноћом. Ово запажање први пут је дато у кратком чланку америчког астронома С. Њукомба (Newcomb, 1881), али је остало незапажено више од пола века. Тек после опсежнијег рада Ф. Бенфорда (Benford, 1938) оно је постало познато као закон аномалних бројева, да би касније (под разним именима) нашло широку примену у разним областима научних истраживања.

Развој математичких и статистичких дисциплина у последњих неколико деценија резултовао је правом експанзијом у разумевању и примени овог закона. Поред осталог, он се показао као корисно средство у анализи резултата избора. Коришћењем закона прве цифре испитивано је манипулисање на већем броју избора широм света, на пример на изборима у Бразилу 1994, у Украјини 2009, у Авганистану 2009, у Ирану 2009, у Шпанији 2015. и 2016, у Гани 2012. и 2020, у САД 2018. и 2020, и др. У нашој литератури примат у оваквим истраживањима припада З. Ковачићу, који је овај

DRAFT VERZIJA

инструмент користио, уз друге методе, у анализи неколико последњих избора на различитим нивоима (председнички, парламентарни, локални) у Србији (Kovačić, 2024). Аутор овог рада илустровао је примену закона у анализи парламентарних избора у Србији у 2012. години (Буквић, 2025).

Као што је поменуто, Ф. Бенфорд је Њукомбово запажање подвргао врло опсежној анализи. Тестирањем великих скупова података из различитих области географије, физике, демографије... (укупно 20.229 опсервација) он је закључио да постоји законитост која се приближно може изразити на следећи начин. Вероватноћа појављивања цифре 1 као прве од 0,306 приближно је једнака логаритму (за основу 10) броја 2, вероватноћа појављивања цифре 2 као прве од 0,185 тек је нешто већа од логаритма броја 3/2, а да вероватноћа појављивања наредних цифара n (n = 3, 4, …, 9) као првих чува овај однос (n+1)/n као резултат логаритмовања за наведену основу (10). Дакле:

$$F_a = log\left(\frac{a+1}{a}\right) \quad (1)$$

где је са Fa означена вероватноћа појављивања цифре *a* као прве у вишецифреним бројевима.

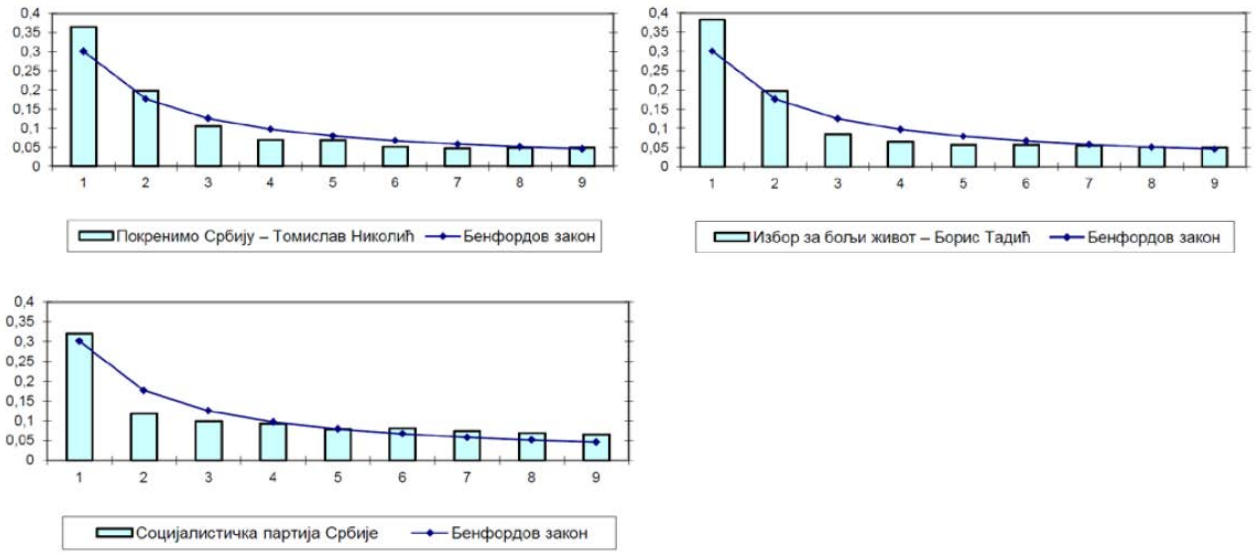
2. ИЗБОРНА ФОРЕНЗИКА: ПАРЛАМЕНТАРНИ ИЗБОРИ У СРБИЈИ 2012–2023.

Избори су процес којим се у оквирима политичког система сваке земље реализује право народа да артикулише своју вољу као основу државне власти, како утврђује Универзална декларација о правима човека из 1948 (члан 21). Према Декларацији, народна воља „мора да буде изражавана на повременим и слободним изборима, који ће да буду спровођени према општем и једнаком праву гласа, тајним гласањем или одговарајућим поступком који обезбеђује слободно гласање". Остварење тако дефинисане народне воље претпоставља успостављање адекватног законског оквира и услова за њено реализовање, што се кратко изражава као „слободни" и „поштени" избори (Јовановић, 2023).

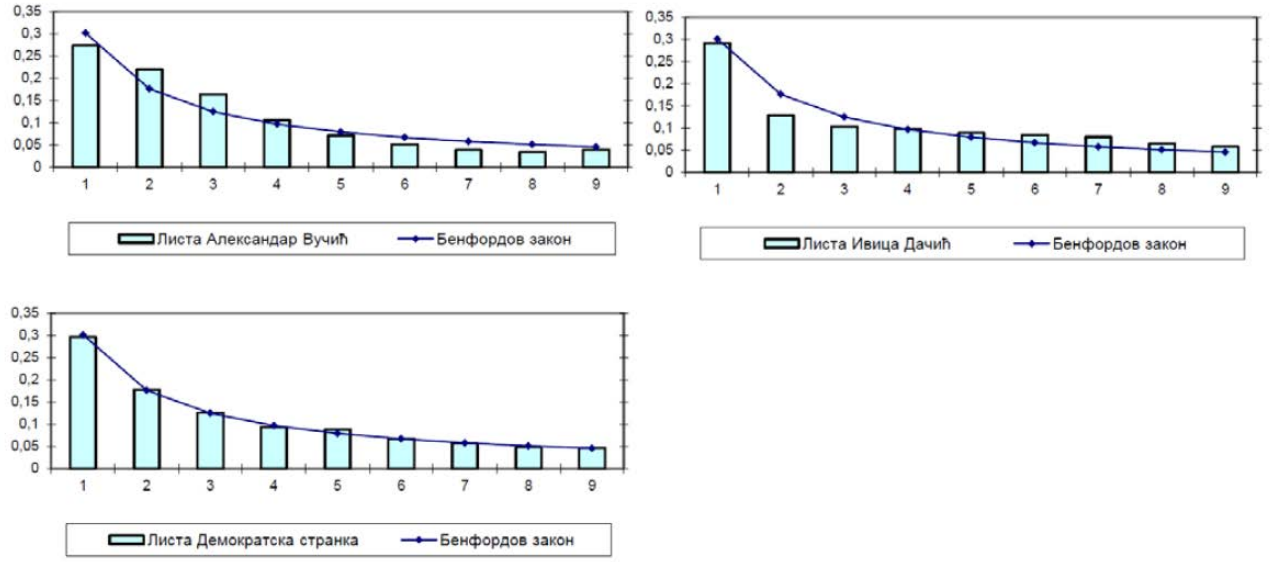
Избори су, међутим, по правилу, оптерећени неповерењем, сумњичењима и оспоравањима, ради чијег су отклањања, или бар ублажавања, разрађени многи инструменти контроле и провере изборног процеса. Свему томе и ми у Србији сведочимо од првих избора по увођењу вишестраначја 1990. У таквим условима примена квантитативних метода анализе може бити изузетно корисна. У овом тексту биће дата једна таква анализа, заснована на поменутом закону прве цифре. Анализа је сачињена на званичним резултатима парламентарних избора у Србији по бирачким местима, у периоду 2012–2023, објављеним на сајту Републичког завода за статистику.

2.1. Парламентарни избори у Србији кроз призму прве цифре

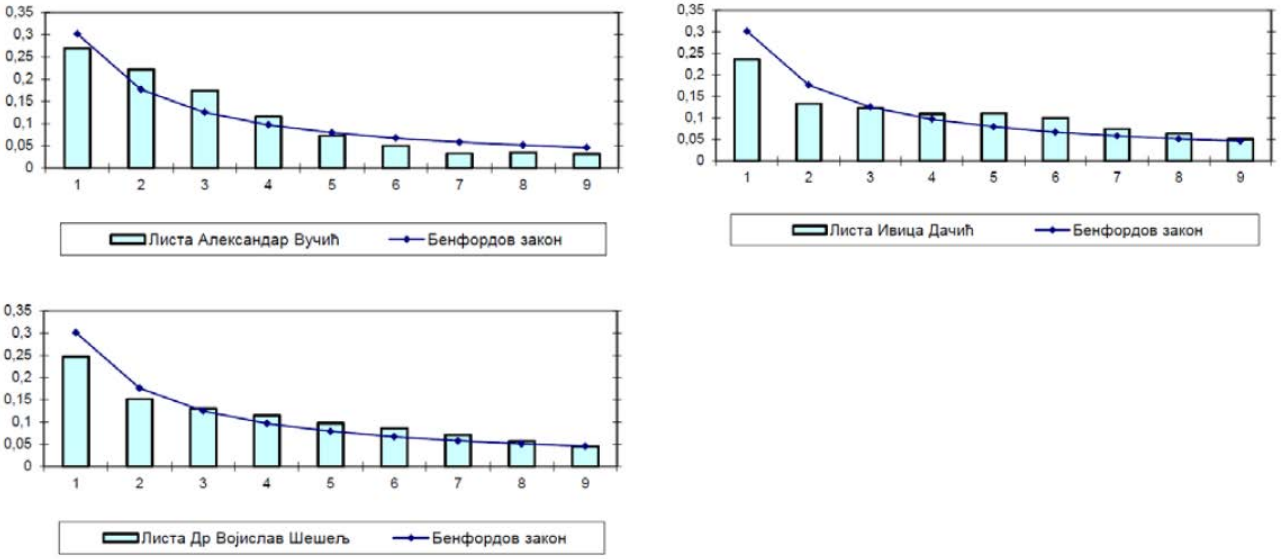
Наредне слике 1–4 приказују вероватноће првих цифара у резултатима три првопласиране изборне листе на четири од пет овде разматраних избора. Наиме, аутору нису били доступни подаци по бирачким местима за парламентарне изборе 2020. и 2023. године. Због тога су резултати избора 2020. изостављени, а графикон двеју првопласираних листа са избора 2023. преузет је из рада (Kovačić, 2024), где је дат распоред фреквенција (добијених гласова) за две водеће листе, у односу на теоријске фреквенције према Бенфордовом распореду, видети сл. 5.



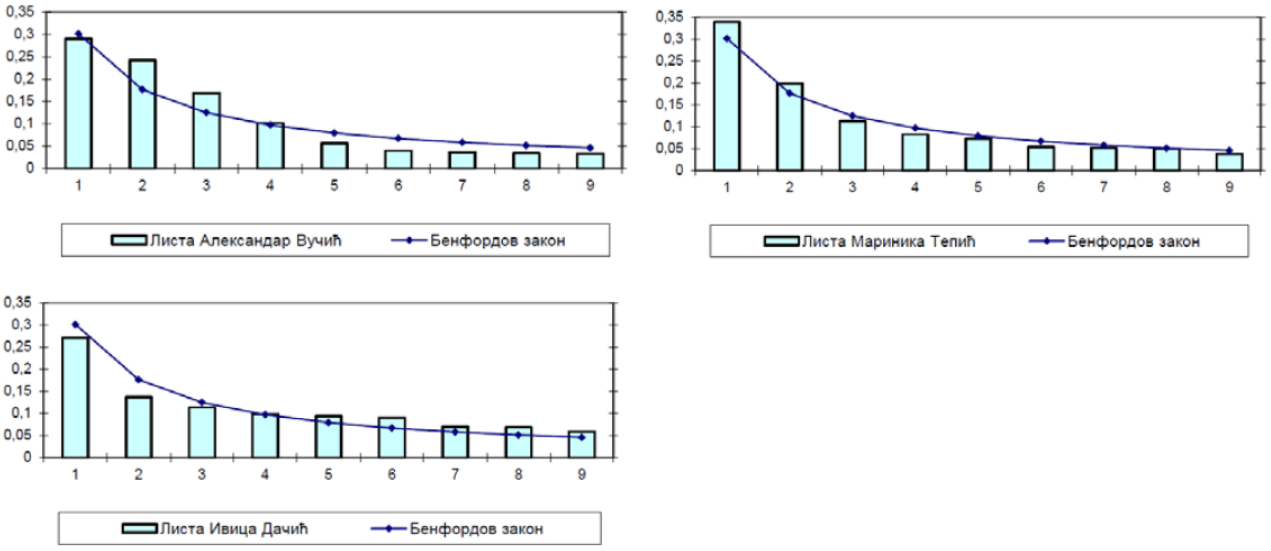
Слика 1: Вероватноће цифара као првих за три водеће листе на изборима 2012. године



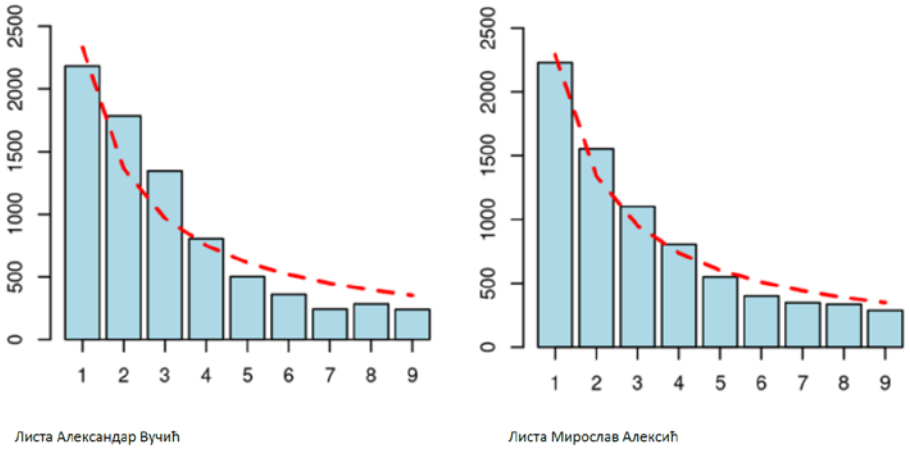
Слика 2: Вероватноће цифара као првих за три водеће листе на изборима 2014. године



Слика 3: Вероватноће цифара као првих за три водеће листе на изборима 2016. године



Слика 4: Вероватноће цифара као првих за три водеће листе на изборима 2022. године



Слика 5: Фреквенције цифара као првих за две водеће листе на изборима 2023. године
Извор: (Kovačić, 2024)

Добијени резултати (фреквенције, тј. освојени гласови изборних листа, и на основу тога вероватноће појављивања цифара као првих), приказани на одговарајућим сликама, показују распоред који визуелно подсећа на Бенфордов, али уз одређена лако приметна, мања или већа, одступања. Да би се оценила величина тих одступања потребно је применити одговарајући статистички тест, који ће одредити њихов степен (значај), односно показати да ли одговарајући распоред заиста припада Бенфордовом. Најједноставнији и најчешће коришћен за ове потребе је χ^2 тест, који се заснива на поређењу стварних и теоријских (Бенфордових) фреквенција

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \tag{2}$$

где су O_i и E_i остварене и очекиване (тј. теоријске, према Бенфордовом закону) фреквенције цифара i (i =1, ..., 9). Добијена вредност статистике пореди се с критичном (теоријском), која у овом случају, за ν=n-1=8 степени слободе, износи 15,51 (за ризик грешке од 5%) и 20,09 (за ризик грешке од 1%). Вредности χ^2 статистике (2) за све разматране изборне листе (табела 1) далеко су веће од ових критичних вредности (чак и најмања међу њима, од 110,91 вишеструко је већа од критичних), тако да се може закључити да распоред прве цифре ни у једном случају не следи Бенфордов распоред, тј. он од Бенфордовог значајно одступа. Једини изузетак је резултат трећепласиране листе на изборима 2014, за који се може рећи да следи Бенфордов распоред прве цифре (видети трећи сегмент слике 2).

Табела 1: χ^2 статистике за водеће изборне листе на парламентарним изборима у Србији

Изборна листа	Избори				
	2012.	2014.	2016.	2022.	2023.
Првопласирана	288,55	360,42	531,99	624,34	516,80
Другопласирана	461,53	317,23	516,83	121,13	113,36
Трећепласирана	409,58	10,98	244,25	290,73	-

2.2. Зависност резултата избора од излазности

Управо истакнути налази (табела 1), према којима распореди вероватноћа практично свих изборних листа не следе Бенфордов распоред, додатно потврђују нужност да се резултати примене теста прве цифре допуне и провере другим методима форензичке анализе. За наше кратко саопштење ми смо се определили за једну од алатки развијених у оквиру руске форензичке школе, наиме за примену регресионе анализе

$$v = \alpha + \beta x \tag{3}$$

где је v – удео освојених гласова изборне листе, а x излазност на разматраним изборима. Дакле, посматра се однос освојених гласова (у процентима) сваке изборне листе, као зависне променљиве, и излазности, као независне променљиве. Резултати за три првопласиране листе на изборима 2012–2022. приказани су у табели 2.

Табела 2: Удели освојених гласова и регресиони коефицијенти за водеће изборне листе на парламентарним изборима у Србији 2012–2022.

Избори	Регресиони коефицијенти / удео освојених гласова	Водеће изборне листе		
		1	2	3
2012.	α	21,17	21,15	9,12
	β	0,043	0,002	0,109
	удео	0,2404	0,2206	0,1451
2014.	α	39,93	5,58	7,47
	β	0,161	0,163	-0,037
	удео	0,4835	0,1349	0,0603
2016.	α	34,08	1,47	5,82
	β	0,270	0,181	0,031
	удео	0,4825	0,1095	0,0810
2022.	α	20,52	86,70	7,58
	β	0,434	-0,388	0,087
	удео	0,4296	0,1367	0,1144

Овај метод у анализи изборних резултата припада Собјањину и Суховољском (Собянин и Суховольский, 1995), који су анализирали резултате избора и референдума у Русији. Метод је често коришћен, иако уз многа оспоравања и контроверзе, као уосталом и други методи математичко-статистичке анализе изборних резултата, видети рецимо (Борисов и Дасничева, 2018). Његов смисао је у коришћењу коефицијента β из једначине (3), који представља, као што знамо, нагиб наведене регресионе функције, и који је добио назив коефицијент Собјањина-Суховољског. У овом контексту он се назива „подршка додатних бирача" (поддержка дополнительных избирателей, ПДИ). Код нормалних избора (без манипулација) одговарајући дијаграм растурања апсциса и ордината удела гласова у излазности по бирачким местима требало би да приближно прати функцију (3), а њен нагиб да буде приближан уделу освојених гласова сваке од изборних листа. Али, ако се те две величине (значајно) разликују, тада има места сумњи у регуларност, односно сумњи да је било неких манипулација, конкретно приписивања гласова одређеној изборној листи. Поред тога, очекује се да константа (слободни члан, који се овде назива „помак регресионе линије", смещение регрессионной линии, СРЛ) α у једначини (3) буде једнак нули (0), или бар близу ње, односно да регресиона линија полази из координатног почетка. Наведени називи коефицијената су се усталили, иако нису баш најсрећније изабрани, и као такви донекле доприносе неразумевању суштине метода.

Као што се види у табели 2, од 12 анализираних изборних листа код бар око половине је видљива управо значајна разлика ових коефицијената, док је у још неколико случајева тешко оценити значај те разлике. Ван такве сумње су, насупрот томе, резултати трећепласиране листе на изборима 2012, другопласиране на изборима 2014, друго- и трећепласиране на изборима 2016, и прво- и трећепласиране на изборима 2022. Код две изборне листе (трећепласирана у 2014. и другопласирана у 2022.) коефицијент Собјањина-Суховољског је негативан, што практично значи да су оне освајале гласове на бирачким местима са мањом излазношћу, а да се њихов проценат освојених гласова (значајно) смањивао с повећањем излазности. Тај резултат свакако захтева додатне анализе. Утолико пре што су у оба случаја, посебно у другом, слободни чланови једначине релативно велики. О даљим карактеристикама и ограничењима овог метода видети (Шалаев, 2016: 93 и даље).

3. ЗАКЉУЧАК

Резултати парламентарних избора у Србији у годинама 2012, 2014, 2016, 2022. и 2023, према расположивим подацима званичне статистике, подвргнути су анализи на основу закона прве цифре (Бенфордовог закона), једног од најчешће коришћених инструмената у форензичкој анализи. Коришћени су подаци за укупно 14 партија (изборних листа), по бирачким местима.

Добијени резултати показали су велико одступање у односу на теоријске резултате које предвиђа закон прве цифре, иако визуелно у свим случајевима распоред вероватноћа има облик који подсећа на Бенфордов. Одговарајућа статистика којом се тестира значај поменутих одступања, наиме, вишеструко је већа од критичне (теоријске) вредности, што захтева одбацивање хипотезе да

ВЕРЗИЈА

распореди вероватноћа следе Бенфордов распоред. На основу тога следи и налаз да са изборима нешто „није било у реду", тј. да је на њима можда било неких манипулација, какве би биле уметање гласачких листића или пуњење гласова и лажирање бирача, или пак стратешко гласање, видети (Kovačić, 2024).

Генерално, у случају одступања вероватноћа од Бенфордовог распореда не може се децидно тврдити да су манипулације постојале. Потребно је, наиме, извршити додатне провере, за шта су у изборној форензици развијени и други методи, и то како алатке на бази осталих цифара, тако и друге (изборни отисак прстију, мултиномијска логистичка регресија и др.). Оваква тестирања, међутим, излазе ван оквира нашег рада.

Независно од тога потребно је скренути пажњу да прва цифра ни у једном од анализираних случајева (уз апострофирани један једини изузетак) није следила Бенфордов распоред, упркос визуелној сличности. Ово је свакако нужно сматрати једним од важних налаза извршених анализа. То би могла да буде још једна потврда проблематичности Бенфордовог закона у изборној форензици, видети (Deckert et al., 2011). Ми наравно нећемо давати такве чврсте закључке, уместо тога истаћи ћемо да добијени налаз појачава истакнути захтев за додатним проверама изборних резултата, утолико више што су они и без оваквих форензичких анализа по правилу били подвргнути сумњама, па и отвореним оптужбама за изборне преваре. У раду је примењен један од метода који може послужити за такве провере. У питању је метод просте регресионе анализе којим се испитује зависност удела освојених гласова изборних листа од излазности. Коефицијент Собјањина-Суховољског (нагиб регресионе криве) показао је у већини случајева значајно одступање од очекиваног, тј. од процента освојених гласова изборних листа, и тиме посредно потврдио сумње у постојање изборних манипулација индикованих испитивањем распореда првих цифара њихових изборних резултата.

Истраживања у овом раду представљају почетне кораке у изборној форензици парламентарних избора у Србији у наведеном периоду. Заједно с резултатима истраживања у цитираној књизи (Kovačić, 2024), она потврђују постојање сумњи у регуларност изборног процеса током дужег периода. С друге стране, извршене анализе подвлаче потребу за даљим истраживањима, уз примену и других метода форензичке изборне анализе.

ЗАХВАЛНИЦА

Ово истраживање није добило екстерно финансирање.

Захваљујем се Златку Ковачићу, који ми је указао на методолошка питања изборне форензике и чија ми је књига била подстицај да се упустим у одговарајућа истраживања.

ЛИТЕРАТУРА

Борисов, И. Б. и Дасничева, Н. В. (2018) Математические методы анализа как фактор оценки результатов выборов, *Гражданин. Выборы. Власть*, (1): 89–96.

Буквић, Р. (2025). Чудесна јединица. *Нова галаксија*, (1): 86–95.

Јовановић, М. Н. (2023) *Слободни и поштени избори: стандарди, концепти и мерења*, Београд: Факултет политичких наука – Службени гласник.

Собянин, А. А. и Суховольский, В. Г. Демократия, ограниченная фальсификациями: Выборы и референдумы в России в 1991–1993 гг. Москва: Издательство ИНТУ, 1995.

Шалаев, Н. Е. (2016) *Электоральные аномалии в постсоциалистическом пространстве: опыт статистического анализа*, диссертация, Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет.

Benford, F. (1938) The Law of Anomalous Numbers, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 78(4): 551–572.

Deckert, J.; Myagkov, M., Ordeshook, P. C. (2011) Benford's Law and the Detection of Election Fraud, *Political Analysis*, 19(3): (245–68)]

Kovačić, Z. (2024).*Forenzička analiza izbora u Srbiji. Predsednički, parlamentarni i lokalni izbori*. Beograd: Orion-art books, 2024.

Newcomb, S. (1881) Note on the frequency of use of the different digits in natural numbers, *American Journal of Mathematics*, 4(1), 39–40.

DRAFT VERSION

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Оригинални чланак

КОНКУРЕНЦИЈА И ДОМИНИРАЊЕ НА ТРЖИШТУ ОСИГУРАЊА У СРБИЈИ: МАТРИЦА SV ЗА ПЕРИОД 2018–2024. ГОДИНЕ

COMPETITION AND DOMINATION ON THE INSURANCE MARKET IN SERBIA: SV MATRIX FOR THE PERIOD 2018–2024

РАЈКО БУКВИЋ[1]

[1] Нижегородски инжењерско-економски универзитет, Кнагињино, Русија, r.bukvic@mail.ru, 0000-0001-6744-3912

Резиме: *Чланак истражује конкуренцију и доминирање на тржишту осигурања у Србији (без Косова и Метохије). Примењен је метод матрице SV (Strenght - Variety), а потребни показатељи прерачунати су на основу укупне наплаћене премије осигурања осигуравајућих компанија, према подацима Народне банке Србије за период 2018–2024. Резултати су показали релативно висок укупни степен концентрације (CRSV), као и релативно малу диференцијацију унутар доминантне групе (HTSV). Поред тога, запажа се јасна тенденција смањења оба кључна индикатора који дефинишу матрицу SV: CRSV и HTSV, што показује приближавање квадранту RO матрице SV, односно јачање улоге конкуренције и унутар доминантне групе као и у односу на остале учеснике на тржишту.*

Кључне речи: *концентрација, конкуренција, доминирање, матрица SV, Србија, сектор осигурања.*

Abstract: *The article investigates competition and dominance in the insurance market in Serbia (excluding Kosovo and Metohija). The SV (Strength - Variety) matrix method was applied, and the required indicators were calculated based on the total insurance premiums collected by insurance companies, according to data from the National Bank of Serbia for the period 2018–2024. The results showed a relatively high overall degree of concentration (CRSV), as well as relatively low differentiation within the dominant group (HTSV). In addition, a clear tendency to decrease in both key indicators that define the SV matrix: CRSV and HTSV is observed, which shows an approach to the RO quadrant of the SV market, i.e. a strengthening of the role of competition both within the dominant group and in relation to other market participants.*

Keywords: *concentration, competition, SV matrix, domination, Serbia, insurance sector.*

1. УВОД

Уобичајене поделе тржишних стања на монопол, монополистичку конкуренцију, олигопол и слободну (савршену) конкуренцију карактеришу уџбенички приступ. У том домену оне могу дати мање или више задовољавајуће резултате, али у стварности не одражавају увек довољно добро реалне институционалне услове пословања компанија. То се односи на ситуације у којима један њихов број поседује допунске институционалне предности у односу на остале (тесне везе с државом, лакши приступ мање скупим ресурсима, иновационим технологијама и сл.), што им омогућава да утичу на тржишне стандарде и прихваћена правила.

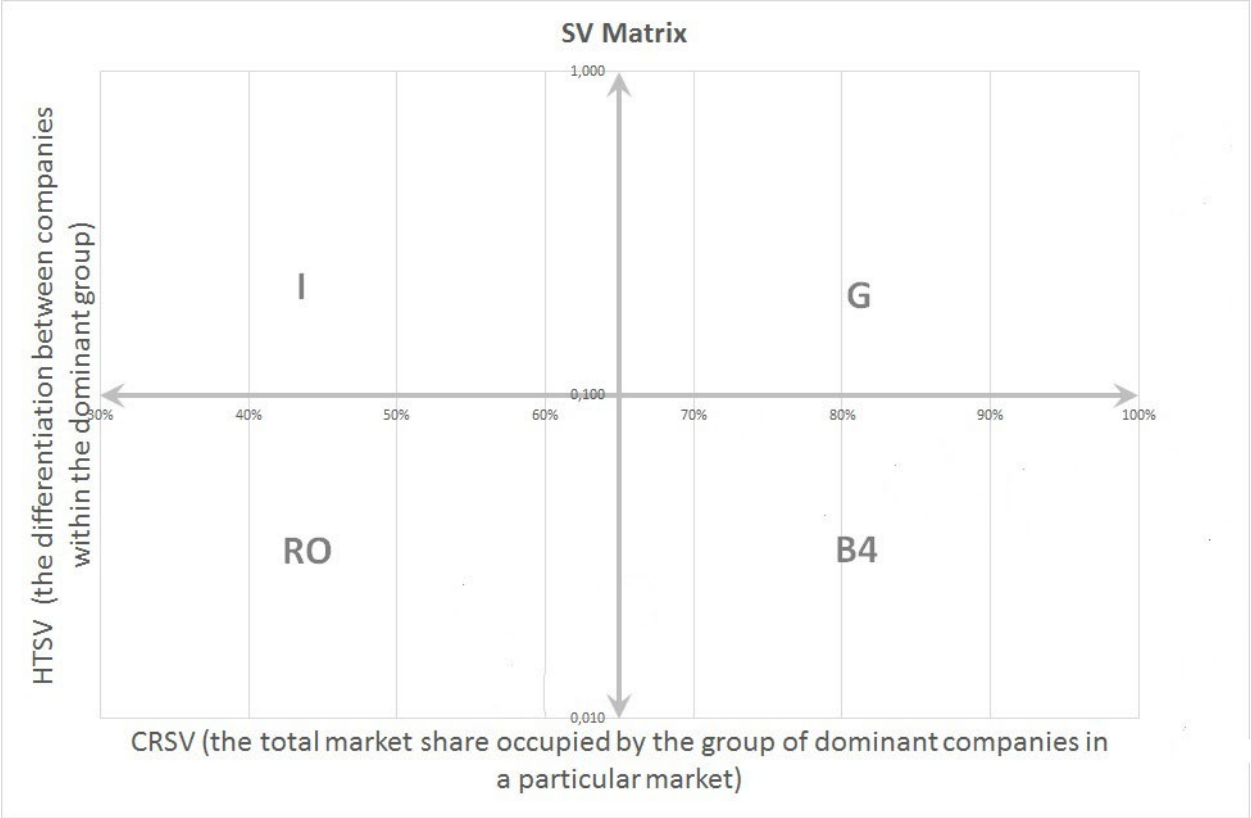
У овом истраживању биће одређене доминантне компаније (алфа компаније) у сектору осигурања у Србији (без Косова и Метохије) у периоду 2018–2024. применом метода одређивања матрице SV (Strenght - Variety), новог аналитичког инструмента, али који је већ пронашао примену у бројним областима анализе, видети на пример (Марков, 2023; Исаков и Суслова, 2024) и др. Основе методологије CV матрице, којима се истражује алфа-бизнис, односно пословање алфа-компанија, поставила је група руских аутора (Щелокова и Вертоградов, 2021; Говорова и др., 2025), полазећи управо од карактеристика и, пре свега, ограничења традиционално примењиваних показатеља концентрације и конкуренције и поставки теорије економског доминирања (ТЕД). Ова теорија (Блохин и др., 2019) дели компаније на алфа, бета и гама. Алфа-, бета- и гама-бизнис разликују се не само размерима, већ и понашањем на тржишту, статусом, који успостављају себи и другим. Главна

DRAFT VERZIJA

разлика алфа-бизниса од других састоји се у уникатности његовог тржишта, ограниченог само његовим сопственим могућностима. Бета-бизнис мултипликује ефекте од коришћења своје специфичне активе. Гама-бизнес конкурише у преосталим тржишним нишама.

2. МЕТОДОЛОШКА ОБЈАШЊЕЊА

За разлику од уобичајених анализа тржишних стања, заснованих на коришћењу једног показатеља, уз евентуално издвојену, допунску употребу неког од других индикатора, методологију матрице SV одликује комплексан приступ. Већи број аналитичких инструмената не само што допуњују један другог, већ следе јединствени циљ – израду матрице која показује степен концентрације на датом тржишту, постојање доминантне групе (алфа-компаније) и разлике у снази компанија у оквиру ове групе (видети слику 1).



Слика 1: Матрица SV

Ради остварења наведеног циља обрачунава се и користи већи број показатеља. За одређивање степена концентрације изабран је уобичајени коефицијент концентрације CRn

$$CRn = \sum_i^n s_i \tag{1}$$

где је s_i удео компаније i у укупној вредности величине (најчешће приход, али може бити и актива, капитал, број запослених итд.) у оквиру одговарајуће гране (делатности). Индикатор (1) не узима у обзир све учеснике на тржишту, већ одређени број највећих (обично 4, мада има и другачијих приступа). Док је избор броја n у стандардним истраживањима арбитраран, овде је он одређен потребама истраживања и резултатима које даје примена другог инструмента, наиме система индекса Линда (Linda, 1976):

$$ILn = \frac{1}{n(n-1)} \sum_i^{n-1} \frac{n-1}{i} \frac{CR_i}{CR_n - CR_i} \tag{2}$$

који показује (идентификује) евентуалну групу која доминира (олигопол). Број чланова такве групе одређен је низом добијених индекса (2), као број за који је ILn < ILn+1, дакле прекидом опадања низа ILi.

Тиме је уједно одређена и вредност која ће се добити за CRSV, тј. збирни удео групе доминантних компанија на посматраном тржишту. Ова вредност приказује се на хоризонталној оси матрице SV, која узима вредности у распону од 30% до 100% (уколико је збирни удео групе алфа-компанија мањи

од 30% не може се говорити о доминирању). Раздеобна линија на овој оси је 65%: збирни удео алфа-компанија мањи од 65% значи да је њихова позиција слаба и да се оне суочавају са суштинском конкуренцијом од стране других компанија на тржишту, док супротно томе удео већи од 65% показује да је тржиште готово у потпуности под контролом ове групе, док остале компаније немају значајан утицај на положај доминирајућих.

На вертикалној оси приказује се хомогеност, односно диференцијација унутар групе доминантних компанија, која се изражава степеном концентрације тржиших удела компанија које чине доминантну групу. За то се користи Хол-Тајдманов коефицијент концентрације (Hall & Tideman, 1967):

$$HT = \frac{1}{2(\sum_{i=1}^{N} R_i s_i) - 1} \tag{3}$$

где је са R_i означен ранг компанија према величини тржишних удела (у опадајућем низу). Како израз (3) показује степен концентрације у целом скупу (све компаније на тржишту), потребно га је модификовати. Најпре се, наравно, одређује HTn, дакле индекс у оквиру групе доминантних компанија, према формули (3), али узимајући у обзир само доминантну групу. Затим је потребно извршити нормализацију добијеног индекса

$$HTSV = \frac{HTn - 1/n}{1 - 1/n} \tag{4}$$

чиме се неутралише факат да минимална вредност индекса (3) зависи од величине скупа (HTmin=1/n), односно добијају се вредности које су упоредиве за скупове различите величине. Одређивањем HTSV добија се и друга координата дате тачке (компаније) на слици 1. Распон у коме се крећу вредности на овој, вертикалној оси креће се фактички од нуле (0) до јединице (1). али се на одговарајућем графикону приказује у логаритамској трансформацији, чиме се на половини вертикале добија вредност 0,1.

Очигледно је да правац југозапад-североисток дефинише кретање од конкуренције ка доминацији, и обрнуто. У крајњем делу левог доњег квадранта конкуренција је најжешћа, а конкуренција уопште одликује цео квадрант, због чега је он и назван «Црвени океан», према (Kim i Mobornj, 2021). Насупрот томе, у крајњем углу горњег десног квадранта смештена је доминирајућа супер-алфа компанија, односно један очевидни лидер који одређује правила игре на том тржишту, док цео квадрант одређује доминација групе у односу на остале учеснике на тржишту. Односе учесника у оквиру доминантне групе показује степен њихове дифеенцијације, исказан коефицијентом HTSV.

У зависности от израчунатих вредности HTSV и CRSV одговарајуће тржиште ће се наћи у једном од четири квадраната матрице SV (слика 1), чије су карактеристике приказане у наредној табели (Щелокова и Вертоградов, 2021; табела 1), и који су добили прикладне називе: IKEA, GAZPROM, RED OCEAN, BIG4 (Велика четворка).

Табела 1: Опис квадраната матрице SV

	30% < CRSV < 65% Низак тржишни удео доминирајуће групе	CRSV > 65% Висок тржишни удео доминирајуће групе
HTSV > 0,1 Висок ниво диференцијације унутар доминирајуће групе	Квадрант I – «Ниске или природне баријере» Постоји један очити лидер унутар доминирајуће групе, али на тржиште стално ступају нови играчи, тако да није могуће утврдити баријере за њихов улазак	Квадрант G – «Доминирајућа супер-алфа» Постоји један очити лидер унутар доминирајуће групе (супер-алфа, или чак неколико супер-алфи) који одређује правила игре на том тржишту
HTSV < 0,1 Низак ниво диференцијације унутар доминирајуће групе	Квадрант RO – «Црвени океан» Компаније из доминирајуће групе активно конкуришу једна с другом, као и са свим осталим компанијама на тржишту (бета и гама компанијама)	Квадрант B4 – «Природни олигопол» У доминирајућу групу улази неколико по могућностима упоредивих компанија, заинтересованих за спречавање уласка у групу нових играча

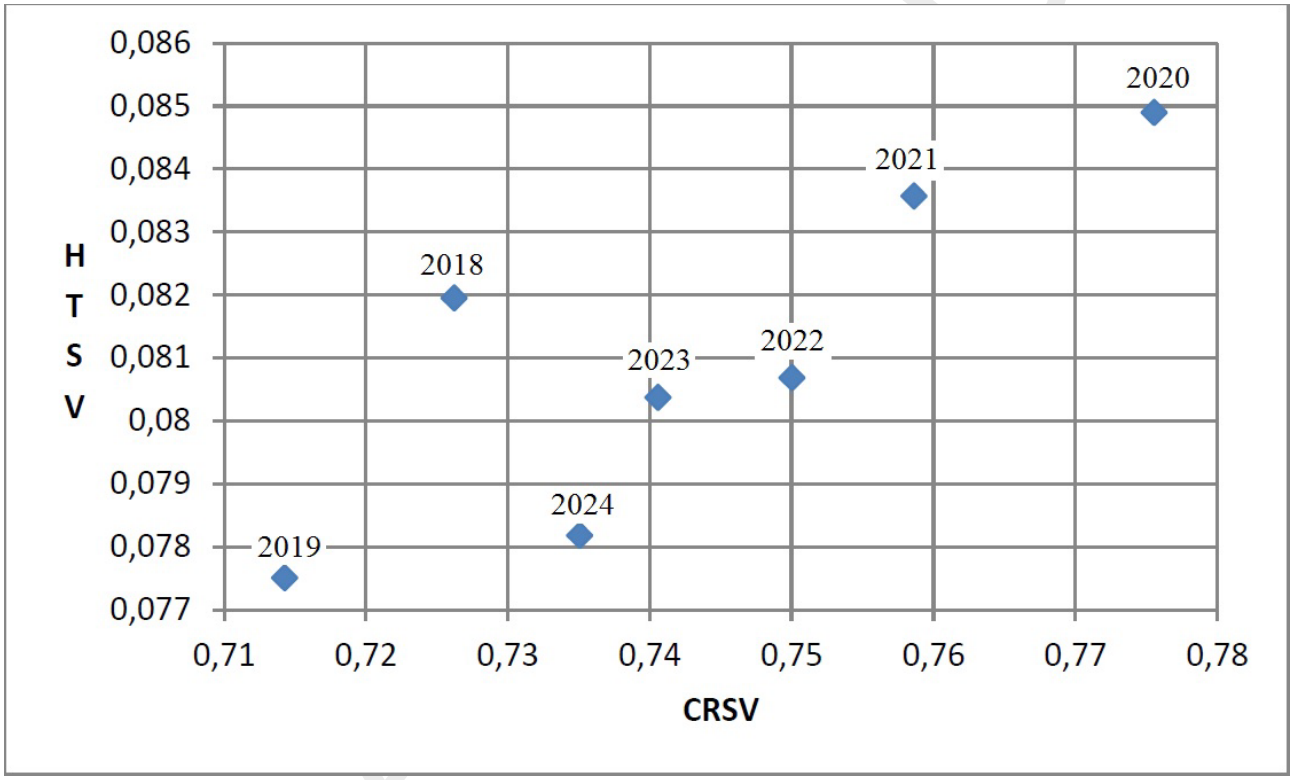
3. РЕЗУЛТАТИ

Према методолошким поставкама и користећи податке Народне банке Србије о осигуравајућим компанијама Србије (без Косова и Метохије) одредили смо све неопходне елементе за конструкисање

DRAFT VERZIJA

матрице SV (слика 2). Сви неопходни коефицијенти обрачунати су на основу вредности промењиве «Укупна наплаћена премија». Добијени рзеултати показују да вредности HTSV и CRSV у свим посматраним годинама припадају квадранту B4, који су аутори методологије назвали «Природни олигопол».

Као што се види (слика 2), у посматраном периоду сектор осигурања Србије (без Косова и Метохије) лоциран је у квадранту B4, којег карактеришу висок ниво концентрације и низак ниво разлика унутар групе доминантних компанија. Доминантну групу (одређену по критеријуму система индекса Линда) чинило је у прве две године четири (2018. и 2019: Дунав, Generali osiguranje, ДДОР, Wiener), а у потоњим годинама пет компанија (Дунав, Generali osiguranje, ДДОР, Wiener, Триглав), уз мање промене у њиховом редоследу по величини тржишног удела у појединим годинама. Као што се види на слици 2, њихов збирни удео кретао се од нешто преко 71% до готово 78%, што би могло да сугерише доста висок степен концентрације. Међутим, овакав закључак не би потврдиле и вредности Хиршман-Херфиндаловог индекса концентрације (Hirschman, 1945; Herfindahl, 1950), према коме би тржиште осигурања у Србији (без Косова и Метохије) пре требало класификовати као умерено концентрисано.



Слика 2: Матрица SV за сектор осигурања у Србији (без Косова и Метохије) 2018–2024.

На слици 2 приказан је само квадрант B4 у коме се налазе показатељи из свих посматраних година. Горе наведена тенденција сугерише да је у наредном периоду реално очекивати даље уједначавање разлика између доминантних компанија, као и даље смањење њиховог збирног удела у укупној величини разматране промењиве (укупна наплаћена премија). Наравно, на конкретна кретања у будућности ће утицати велики број фактора, укључујући како стратегије самих компанија из доминантне групе и њихових осталих конкурената, тако и институционални услови. које ће стварати и компаније у оквирима својих могућности, видети рецимо разматрање (Вертоградов, 2020), као и (Vertogradov et al., 2023), али пре свега држава, којој уређивање институционалног амбијента по праву и припада.

Вредности кључних индикатора за овај сектор у посматраном периоду приказује табела 2. Као општа карактеристика из ове табеле (такође, и са слике 2) може се констатовати тенденција смањења концентрације. Прекид (али само привидан) може се видети у 2020, када се групи четири доминантне компаније придружила и пета, тако да је тада заправо извршена својеврсна транслација линије тренда у правцу североистока, али је она задржала своју основну тенденцију. Саме вредности HTSV довољно су блиске граници која раздваја овај квадрант (B4) од квадранта G, али наведена тенденција

очито показује тежњу удаљавања од њега, као и с друге стране приближавања другој (вертикалној) граници која раздваја овај квадрант од квадранта јаке конкуренције (RO).

Табела 2: Кључни показатељи концентрације у сектору осигурања Србије (без Косова и Метохије) 2018–2024.

Показатељ	2018.	2018.	2020.	2021.	2022.	2023.	2024.
CR4 (%)	72,62	71,43					
CR5 (%)			77,55	75,86	75,00	74,06	73,51
HH (%)	1597	1545	1506	1468	1435	1410	1392
HT (%)	15,57	15,18	14,87	14,33	14,13	13,97	13,81
HTSV	0,0819	0,0775	0,0849	0,0836	0,0807	0,0804	0,0782
Квадрант	B4	B4	B4	B4	B4	B4	B4

4. ЗАКЉУЧАК

У раду је извршено истраживање конкуренције и доминирања на тржишту осигурања Србије (без Косова и Метохије) у периоду 2018–2024. Примењен је метод SV матрице, који је разрадила група руских научника. Метод се заснива на конструисању графикона у дводимензионалном правоуглом систему, с осама које показује две кључне величине: CRSV (степен концентрације) и HTSV (диференцијалица у оквиру доминантне групе).

Доминантну групу, екстраховану методом система индекса Линда, чине четири компаније (у 2018. и 2019), односно пет компанија у свим наредним годинама. Добијени резултати показали су релативно висок степен концентрације (збирни тржишни удео доминантне групе кретао се између 71 и 78 процената) и релативно ниску диференцијацију међу њима. На основу тога у свим посматраним годинама у матрици SV налазе се тражени индикатори, на основу којих се у свим годинама тржиште осигурања у Србији (без Косова и Метохије) сврстава у квадрант B4 (природни олигопол).

ЛИТЕРАТУРА

Блохин, А. А. (2015). Экономика ненужной продукции: институциональные особенности кругооборота потерь, *Экономическая политика*, 10(1), 7–40.

Блохин, А. А., Ломакин-Румянцев, И. В., & Наумов, С. А. (2019). Альфа-бизнес на российском продовольственном рынке, *Экономические стратегии*, 21(6), 68–77. https://doi.org/10.33917/es-6.164.2019.68-77

Вертоградов, В. А. (2020). Рыночные стратегии альфы, беты и гаммы в контексте теории экономического доминирования, *Экономические стратегии*, 22(2), 50–53. https://doi.org/10.33917/es-2.168.2020.50-53

Говорова, А. В.; Вертоградов, В. А.; Щелокова, С. В.; Марков, Н. И.; Спектор, С. В.; Суслова, И. П.; Гридин, Р. В.; Иванчина, А. А. (2025). *Матрица SV как инструмент стратегического анализа уровня конкуренции и доминирования*, Москва: Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.

Исаков, И. З. и Суслова, И. П. (2024). Оценка уровня доминирования на рынке онлайн-образования Российской Федерации, *Научные труды. Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН*, 22(3), 72–87. https://doi.org/10.47711/2076-3182-2024-3-72-87

Марков, Н. И. (2023). Анализ конкуренции и уровня доминирования на рынке продуктов для лечения сахарного диабета в России, *Медицинский совет*, 17(3), 242–263. https://doi.org/10.21518/ms2023-018

Щелокова, С. В.; Вертоградов, В. А. (2021). Матрица SV: инструмент стратегического конкурентного анализа с учётом уровня доминирования, *Вестник Московского университета. Серия 6. Экономика*, 56(6), 137–162. https://doi.org/10.38050/0130010520216.7

Hall, M. & Tideman, N. (1967). Measures of concentration, *Journal of the American Statistical Association*, 62(317), 162–168.

DRAFT VERZIJA

Herfindahl, O. C. (1950). *Concentration in the steel industry*, Dissertation, New York: Columbia University.

Hirschman, A. O. (1945). *National Power and the Structure of Foreign Trade*, Berkley & Los Angeles: University of California Press.

Kim, V. Č. i Mobornj, R. (2021). *Strategija plavog okeana: kako se izboriti za mesto na tržištu i učiniti konkurenciju nebitnom*, Beograd: Finessa.

Linda, R. (1976). *Méthodologie de l'analyse de la concentration appliqué e à l'étude des secteurs et des marchés*, Commission des Communautés européennes, Septembre 1976.

Vertogradov, V.; Shchelokova, S.; Govorova, A. (2023). Joint application of BCG (growth-share) and SV (strength-variety) matrices for the product strategy development, International May Conference on Strategic Management, IMCSM23, Vol. 19, Bor, Serbia:. — P. 202–213.

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

HIBRIDNI PRISTUP PREDIKCIJE NBA DRAFTA: MAŠINSKO UČENJE U KOMBINACIJI SA IVANOVIĆEVIM ODSTOJANJEM

HYBRID APPROACH TO NBA DRAFT PREDICTION: MACHINE LEARNING COMBINED WITH I-DISTANCE

PETAR GRAOVAC[1], MILAN RADOJIČIĆ[2], ALEKSANDAR ĐOKOVIC[3]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, petar.graovac@fon.bg.ac.rs, 0009-0007-3060-3573
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, milan.radojicic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-6727-7608
[3] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, djokovic.aleksandar@fon.bg.ac.rs, 0000-0001-7036-1440

Rezime: *Precizno predviđanje koji će koledž igrači biti izabrani na NBA draftu i dalje predstavlja izazovan zadatak sa visokim ulozima, ali i neuravnotežen klasifikacioni problem. Ovo istraživanje predlaže pristup koji integriše analizu glavnih komponenti radi redukcije dimenzionalnosti, SMOTE tehniku za balansiranje klasa i hibridni model koji koristi Ivanovićevo odstojanje za poređenje rezultata osam algoritama mašinskog učenja, primenjenih na više od 4.500 NCAA igrača iz generacija od 2011. do 2020. godine. Performanse modela evaluirane su pomoću četiri metrike osetljive na neuravnoteženost klasa – F1 ocena za pozitivnu klasu, Matthewsov korelacioni koeficijent (MCC), površina ispod Precision-Recall krive (AUPRC) i izbalansirana tačnost (Balanced Accuracy), a sve su objedinjene kroz Ivanovićevu distancu kako bi se dobila sveobuhvatna rang-lista modela. Random Forest je postigao najbolji kompozitni rezultat (F1 = 0.56; MCC = 0.50; AUPRC = 0.56; Balanced Accuracy = 0.78), a odmah za njim su sledili neuronske mreže, XGBoost i SVM. Analiza pokazuje da su dvosmerni učinak (napredne ofanzivne i defanzivne metrike) i efikasnost u šutu sa distance pouzdaniji indikatori draft rezultata nego sirovi broj poena ili udeo u timskoj igri.*

Ključne reči: *Ivanovićevo odstojanje, Mašinsko učenje, Hibridni model, Predikcija NBA drafta.*

Abstract: *Accurately forecasting which college athletes will be selected in the NBA Draft remains a high-stakes yet imbalanced classification problem. This study proposes a data-driven pipeline that integrates Principal Component Analysis (PCA) for dimensionality reduction, Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) for class balancing, and I-distance for eight machine-learning algorithms to predict draft selection for more than 4,500 NCAA players from the 2011–2020 cohorts. Performance is benchmarked with four imbalance-sensitive metrics—positive-class F1, Matthews Correlation Coefficient (MCC), Area Under the Precision-Recall Curve (AUPRC), and Balanced Accuracy and they are synthesized via Ivanovic distance to obtain a holistic rank of each model. Random Forest achieved the best composite score (F1 = 0.56; MCC = 0.50; AUPRC = 0.56; Balanced Accuracy = 0.78), followed closely by Neural Networks, XGBoost, and SVM. Analysis reveals that two-way impact (advanced offensive and defensive metrics)and perimeter efficiency skills are stronger draft indicators than raw scoring or usage rate.*

Keywords: *I-distance, Machine Learning, Hybrid Model, NBA Draft prediction.*

1. UVOD

Košarka je postala svetski fenomen koji utiče na kulturni i ekonomski razvoj nacija širom sveta (Szymanski, 2010). Njena jednostavna pravila i dinamičan tempo omogućili su joj da osvoji široku publiku različitih uzrasta, društvenih slojeva i iz različitih regiona (Silk & Andrews, 2012).

NBA se nalazi u samom centru savremene košarke kao vodeća profesionalna liga, koja svojom organizacijom i ugledom privlači vrhunske talente iz čitavog sveta i predstavlja simbol kvaliteta kako na terenu, tako i van njega (Chiba, 2012). Strateško korišćenje medija i sistematično upravljanje talentima omogućili su joj dominaciju ne samo u sportu, već i u drugim važnim sferama javnog života (Boyd & Shropshire, 2000). NBA igrači često prevazilaze granice sportskih ličnosti, već postaju kulturne ikone i međunarodni ambasadori različitih ideala (Boyd, 2003).

DRAFT VERZIJA

Uspeh lige ne zavisi isključivo od pobeda i šampionskih titula, on se u velikoj meri oslanja na sposobnost timova da identifikuju, razviju i angažuju perspektivne mlade igrače sa potencijalom da postanu buduće zvezde. Skauting i razvoj igrača posmatraju se kao ključne investicije, neophodne ne samo za uspeh timova već i za dugoročnu održivost same lige. Greške u proceni kapaciteta mladih sportista mogu dovesti do finansijskih gubitaka u desetinama miliona dolara, što dodatno naglašava važnost preciznog, strukturiranog i strateškog procesa selekcije igrača (Johnston et al., 2022). Kao rezultat toga, NBA Draft se više ne posmatra samo kao sportski događaj, već kao ključni trenutak koji oblikuje budućnost lige. NBA Draft predstavlja strukturisan sistem putem kojeg timovi biraju nove igrače, po unapred definisanim pravilima.

Ključno mesto u ovom procesu ima NCAA liga, koja igra bitnu ulogu u razvoju budućih NBA igrača (Hosick & Sproull, 2012). NCAA omogućava paralelno usavršavanje tako da sportisti mogu istovremeno da stiču visoko obrazovanje i takmiče se u profesionalnoj košarci (Thelin, 1996). Ipak, uspeh na univerzitetskom nivou ne garantuje lak prelazak u NBA. Brži ritam igre, veće fizičko opterećenje, složenija taktika i pojačana pažnja medija neretko otežavaju prelazak i onim koledž igračima koji su se do tada isticali (Staw & Hoang, 1995).

Procenjivanje igrača tokom njihove koledž karijere podrazumeva analizu brojnih faktora koji mogu ukazivati na njihov dugoročni potencijal. Tradicionalne statistike kao što su broj poena, skokova, asistencija i procenat šuta služe kao osnovni pokazatelji učinka. Međutim, sa razvojem savremene sportske analitike, napredne metrike sve više dobijaju na značaju u pružanju dubljeg uvida u efikasnost igrača (Oliver, 2004; Kubatko et al., 2007).

Kako bi unapredili predviđanje dugoročnog uspeha u NBA-u, timovi analitičara sve više koriste tehnike mašinskog učenja. Modeli kao što su logistička regresija, mašine sa pomoćnim vektorima (SVM), nasumične šume (Random Forests), stabla odlučivanja i neuronske mreže pokazali su se efikasnim u predviđanju dužine trajanja igračke karijere u ligi (Schumaker et al., 2010; Teramoto et al., 2018). Iako nijedan model ne može garantovati potpunu tačnost, integracija izbora najbolje metode mašinskog učenja i sama primena te metode u proces procene bi mogla da doprinese boljem donošenju odluka. S obzirom na sve navedeno, vrednovanje potencijala mladih košarkaša ostaje jedan od najzahtevnijih zadataka za skaute, generalne menadžere i sportske analitičare. Kako se vrednost igrača procenjuje ne samo na osnovu njihove učinka na koledžu, već i prema projekcijama njihovog budućeg doprinosa timu, postaje jasno da je procena uspeha nakon drafta više od sportskog izazova, tj. ona predstavlja ozbiljan naučni i istraživački problem.

Nakon uvoda, u drugom poglavlju biće objašnjeni podaci korišćeni u ovom istraživanju, dok će treće poglavlje prikazati korišćenu metodologiju. Četvrto poglavlje predstavlja analizu i rezultate istraživanja, dok peto predstavlja zaključke istraživanja.

2. PODACI

Podaci su preuzeti iz baze BartTorvik (Torvik, B), koju održava NCAA analitičar Bart Torvik, a koja sadrži sveobuhvatne timske i individualne statistike igrača od 2009. godine do danas. Ova baza podataka se smatra pouzdanim izvorom među analitičarima i skautima, jer nudi veliki broj statističkih karakteristika za svakog koledž igrača.

Ovaj rad analizira NCAA koledž igrače iz generacija od 2011. do 2020. godine koji su ispunjavali sledeće kriterijume: korišćenje igrača od najmanje 10%, Box Plus/Minus veći od 0, učestvovanje u najmanje 50% raspoloživih minuta i igranje u preko 85% regularnih utakmica svog tima u sezoni pre izlasta na draft. Ovi kriterijumi su postavljeni kako bi se obuhvatili igrači sa značajnim učešćem u timskoj igri, s obzirom na to da nedovoljna minutaža u NCAA šampionatu znatno umanjuje šanse za izbor na NBA draftu, te su takvi igrači isključeni iz analize. Učestvovalo je preko 4500 igrača. Za analizu je korišćen Google Collaboratory.

3. METODOLOGIJA

Zbog velikog broja varijabli, korišćena je analiza glavnih komponenti radi transformacije podataka u manji broj reprezentativnih karakteristika, koje su svrstane u tri kategorije: šutiranje, odbrambene i napadačke osobine (Abdi & Williams, 2010). Konkretno, procenat pogođenih šuteva sa blizine i sa distance za dva poena objedinjeni su u atribut „šut iznutra“, dok su procenat pogođenih trojki i slobodnih bacanja grupisani u atribut „šut spolja“. Odbrambeni atributi su podeljeni na „naprednu odbranu“, koja obuhvata Defensive Player Regularized Plus/Minus, Defensive Box Plus/Minus i Defensive Rating, i na „osnovnu odbranu“, koja uključuje blokade, ukradene lopte i defanzivne skokove. Slično tome, napadačke osobine su podeljene na „napredni napad“ (Player Regularized Plus/Minus, Offensive Box Plus/Minus, Offensive Rating) i „osnovni napad“ (asistencije, ofanzivni skokovi i izgubljene lopte). Ove varijable su izabrane kako bi obezbedile uravnotežen prikaz veština svakog igrača. Metrike šutiranja prikazuju efikasnost sa različitih

DRAFT VERZIJA

udaljenosti, dok odbrambene i napadačke statistike – kako osnovne tako i napredne – mere uticaj igrača na obe strane terena.

Varijable koje su korišćene bez korišćenja analize glavnih komponenti uključuju: procenat korišćenja igrača, broj poena i broj zakucavanja tokom sezone. Broj poena je posebno analiziran jer ima poseban značaj kao prediktor uspeha (Katz et al., 2015). Sve varijable su izražene po utakmici kako bi se neutralisale razlike u vremenu provedenom na terenu i obezbedila međusobna uporedivost među igračima. Novokomponovani atributi su očuvali preko 75% ukupnog varijabiliteta unutar svake kategorije (Jolliffe & Cadima, 2016). Zbog neravnoteže klasa u skupu podataka, gde je broj igrača koji su izabrani na draftu znatno manji u odnosu na one koji nisu, korišćena je tehnika sintetičkog naduzorkovanja manjinske klase (SMOTE) kako bi se izbalansirali podaci za treniranje, generisanjem sintetičkih primera manjinske klase (Chawla et al., 2002). Zatim je primenjen novi hibridni pristup u cilju identifikacije najefikasnije metode mašinskog učenja. Ovaj pristup kombinuje rezultate različitih modela mašinskog učenja sa rangiranjem na osnovu Ivanovićevog odstojanja (Ivanović, 1977), tako da se sve pojedinačne metrike svakog algortima sažimaju, kako bi se dobila objektivna procena uspešnosti algoritma. Na taj način, dodatno je uzeta u obzir i međusobna sličnost među rezultatima, čime se omogućava izdvajanje najpouzdanijeg algoritama za predikciju ishoda. U dosadašnjij literaturi ovaj pristup nije korišćen. U okviru ovog istraživanja primenjeni su sledeći algoritmi: XGBoost, mašine sa pomoćnim vektorima (SVM), nasumične šume (Random Forest), neuronske mreže, Naivni Bajes, logistička regresija, K najbližih suseda i stabla odlučivanja.

4. REZULTATI I ANALIZA

Usled korišćena SMOTE metode zbog izražene neravnoteže klasa u podacima o NBA draftu ključno je odabrati odgovarajuće metrike evaluacije kako bi se osigurala tačna procena performansi modela. Tradicionalne metrike poput tačnosti (accuracy) i ROC AUC mogu biti obmanjujuće u kontekstu neuravnoteženih klasa (Saito & Rehmsmeier, 2015), jer često precenjuju uspešnost modela dajući prednost većinskoj klasi. Zbog toga je u ovom istraživanju usvojen skup metrika koje preciznije odražavaju sposobnost modela da tačno identifikuje manjinsku klasu.

F1 ocena predstavlja harmonijsku sredinu preciznosti i osetljivosti, i naročito je koristan kod neuravnoteženih skupova podataka (Powers, 2011). U ovom radu je posebno naglašena vrednost F1 ocene metrike za klasu „Yes“, jer je glavni cilj bio maksimizacija tačne identifikacije draftovanih igrača, uz minimizaciju lažno pozitivnih predikcija.

Matthewsov korelacioni koeficijent (MCC) omogućava sveobuhvatnu procenu uspešnosti binarne klasifikacije uzimajući u obzir sve vrednosti iz matrice konfuzije. MCC se smatra jednom od najpouzdanijih metrika u situacijama sa disbalansom među klasama (Chicco & Jurman, 2020), jer daje jedinstvenu vrednost koja ostaje stabilna čak i kada su distribucije među klasama vrlo neravnomerne.

AUPRC (Površina ispod Precision-Recall krive) meri ravnotežu između preciznosti i osetljivosti pri različitim pragovima klasifikacije i posebno je osetljiva na performanse modela nad manjinskom klasom. Za razliku od ROC AUC, koji može davati nerealno visoke rezultate u neuravnoteženim klasifikacijama, AUPRC daje uvid u slučajevima kada je pozitivna klasa retka (Davis & Goadrich, 2006). Ova metrika uključena kako bi se procenila sposobnost modela da održava visoku preciznost bez žrtvovanja osetljivosti.

Izbalansirana tačnost (Balanced Accuracy) predstavlja prosečnu vrednost osetljivosti (recall) za svaku klasu, čime se ublažava pristrasnost koju standardna tačnost pokazuje prema većinskoj klasi. Ova metrika osigurava da performanse modela ne budu neproporcionalno određene rezultatima na dominantnoj klasi i da se podjednako obuhvate obrasci i kod draftovanih i kod nedraftovanih igrača (Brodersen et al., 2010).

Pored tačnosti i ROC AUC-a, takođe su izračunate i druge standardne metrike kao što su ponderisana i makro-prosečna preciznost i osetljivost, ali nisu izabrane kao glavne metrike evaluacije. Iako ove vrednosti nude pregled učinka modela na sve klase, one mogu prikriti lošije rezultate modela u klasifikaciji manjinske klase. Na primer, ponderisana F1 vrednost može ostati visoka čak i kada model ima slab učinak pri prepoznavanju draftovanih igrača, upravo zbog dominantnog uticaja većinske klase (Saito & Rehmsmeier, 2015). Tačnost je posebno nepouzdana u neuravnoteženim skupovima podataka, u ovom slučaju, model koji predviđa isključivo većinsku klasu („No“) mogao bi ostvariti skoro 90% tačnosti bez da je identifikovao ijednog draftovanog igrača (Chicco & Jurman, 2020).

Sledeća tabela prikazuje rezultate primene različitih tehnika mašinskog učenja i evaluaciju njihove performansi korišćenjem izabranih metrika i Ivanovićevog odstojanja (Tabela 1).

PREDRAG

Algoritam	Metrika, Rang i vrednost Ivanovićevog odstojanja					
	F1 (Draftovan)	MCC	AUPRC	Balansirana tačnost	Rang	Vrednost Ivanovićevog odstojanja
XGBoost	0.53	0.48	0.52	0.76	3	2.20
Mašine sa pomoćnim vektorom	0.52	0.5	0.58	0.84	4	2.14
Nasumične šume	0.56	0.5	0.56	0.78	1	2.90
Neuronske mrže	0.56	0.5	0.52	0.77	2	2.86
Naivni Bajes	0.44	0.4	0.49	0.78	7	0.22
Logistička regresija	0.51	0.48	0.61	0.82	5	1.91
K najbližih suseda	0.44	0.4	0.35	0.78	8	0.11
Stabla odlučivanja	0.48	0.42	0.27	0.74	6	0.85

Rezultati pokazuju da su Nasumične šume i neuronske mreže postigli najbolje ukupne performanse, sa najvećim vrednostima Ivanovićevog odstojanja (2.90 i 2.86), što ukazuje na snažne i uravnotežene rezultate kroz sve izabrane metrike. Algoritmi XGBoost i mašine sa pomoćnim vektorom su bili odmah iza njih, dok je logistička regresija ostvarila najbolji AUPRC, ali je zauzela 5. mesto zbog nižih rezultata po F1 i MCC metrikama. S druge strane, algoritmi Naivni Bajes, K najbližih suseda i stabla odlučivanja su se pokazali najslabije, sa najnižim vrednostima Ivanovićeve distance i posebno niskim F1 i AUPRC rezultatima za pozitivnu klasu (draftovane igrače).

S obzirom na to da je Nasumična šuma ostvarila najveću vrednost Ivanovićevog odstojanja (2.90), što ukazuje na najuravnoteženije i najpouzdanije performanse pri odabranim metrikama, odabran je kao primarni model za dalju analizu u okviru ovog istraživanja.

Rezultati evaluacije (Balanced Accuracy = 0.78, MCC = 0.5, F1 za draftovane = 0.56) potvrđuju da naš višemodelski pristup značajno bolje identifikuje igrače vredne drafta nego slučajno pogađanje, iako još uvek ne sa dovoljno visokom pouzdanošću da bi mogao samostalno donositi konačne odluke. U praksi to znači da analitika može sužavati skup potencijalnih kandidata, sa oko 1.000 igrača koji ispunjavaju uslove na približno 200 najperspektivnijih, dok ljudski faktori i dalje ostaju ključni u konačnom izboru.

Za igrače koji teže NBA draftu, rezultati ukazuju na nekoliko faktora koje mogu kontrolisati. Prvo, efikasnost je važnija od same količine učinka, tj. poboljšanje procenta šuta i učinka u defanzivi (ukradene lopte i blokade) jače je povezano sa pozitivnim ishodom modela nego samo povećanje broja poena po meču. Drugo, svestranost je ključna, kombinovane metrike napredne ofanzive i defanzive su se pokazale kao najbolji prediktori drafta, jer igrači koji imaju iznadprosečne rezultate na oba kraja terena imaju znatno veće šanse da budu izabrani.

Iz ugla timova, postoji nekoliko načina da se poboljša ishod procesa selekcije. Obuka modela sa kaznama za promašene draftove (lažno negativne slučajeve) može pomoći u usklađivanju modela sa rizicima koje tim želi da preuzme. Uvođenje dugoročnih karakteristika, kao što su napredak iz godine u godinu i performanse prilagođene uzrastu, može pomoći da se uoče igrači koji sazrevaju kasnije, a koje trenutni model ne prepoznaje.

Kombinovane metrike napredne ofanzive i defanzive čine skoro 40% ukupnog značaja u modelu, što potvrđuje da timovi najpre tragaju za igračima koji već imaju visoku efikasnost na oba kraja terena, a ne samo za onima koji beleže velike brojke. Broj poena i dalje ima značaj, ali samo u kombinaciji sa šutom iz blizine i sa distance. Osnovni defanzivni pokazatelji (ukradene lopte, blokade, skokovi) imaju umeren uticaj na ukupnu verovatnoću ishoda drafta. Procenat korišćenja igrača pokazuje samo ograničenu prediktivnu vrednost, jer visok udeo u posedu lopte može biti posledica timske taktike, slabije konkurencije u timu ili rotacije, a ne nužno individualne dominacije.

5. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje pokazuje da hibridni model, koji kombinuje Ivanovićevo odstojanje i algoritme mašinskog učenja, može značajno razlikovati NCAA igrače koji će biti izabrani na NBA draftu od onih koji neće. Od osam testiranih algoritama, Random Forest je pokazao najuravnoteženije performanse, sa najvećom

DRAFT VERZIJA

vrednosti Ivanovićevog odstojanja (2.90), F1 ocena za draftovanu klasu od 0.56, MCC vrednošću od 0.51 i balansiranom tačnošću od 0.77. Neuronske mreže, XGBoost i SVM su zaostajali vrlo malo, dok su Naivni Bajes, K najbližih susdea i jednostavna stabla odlučivanja pokazala slabije rezultate u ovoj analizi.

Uzorak je ograničen na NCAA generacije od 2011. do 2020. godine, što isključuje igrače iz G-League Ignite programa, Overtime Elite lige, kao i međunarodne kandidate, čiji razvojni putevi se razlikuju. Osim toga, oslanjanje isključivo na javno dostupne podatke po utakmici i napredne statistike isključuje biometrijske podatke, praćenje kretanja i kvalitativne informacije iz intervjua, koje se uobičajeno koriste u NBA draftu. Na kraju, i pored primene SMOTE tehnike, neravnoteža klasa i promene u stilu igre tokom vremena mogu ograničiti maksimalni uspeh modela.

Praktična primena ovog pristupa je dvostruka. Ovaj novi kombinovani pristup, koji spaja metode mašinskog učenja sa Ivanovićevog odstojanja kao dodatnim kriterijumom za rangiranje modela, pokazao se izuzetno efikasnim u kontekstu predikcije NBA drafta, jer omogućava ne samo klasičnu evaluaciju performansi već i dublje poređenje modela kroz analizu sličnosti i konzistentnosti rezultata. Upotrebom Ivanovićeve distance dodatno je obogaćen proces odabira optimalnog modela, jer se uzima u obzir stabilnost i uravnoteženost modela na različitim metrikama, što je posebno važno u zadacima sa neuravnoteženim klasama. Iako je u ovom radu uspešno primenjen na primeru selekcije košarkaških talenata, ovaj pristup tek treba da nađe svoju širu primenu u drugim oblastima, od medicine, preko tržišnih analiza, do obrazovanja, gde je potrebna pouzdana evaluacija.

Za sve stejkholdere NBA lige, uključujući trenere, skaute, generalne menadžere i same igrače, nalazi ovog istraživanja mogu se pretočiti u jasne razvojne smernice. Rezultati ukazuju da šut spolja, odnosno efikasnost u trojkama i slobodnim bacanjima, zajedno sa naprednim statističkim pokazateljima u odbrani i napadu, predstavljaju najvažnije faktore uspeha na dan drafta. Igrači koji demonstriraju uravnotežen i obostrani doprinos timu – kako u defanzivnim, tako i u ofanzivnim segmentima igre – značajno povećavaju svoje šanse da budu primećeni i izabrani.

Zaključno, modeli mašinskog učenja, kada se uvežu sa pažljivo odabranim evaluacionim metrikama i rangiranjem pomoću Ivanovićevog odstojanja, mogu značajno unaprediti predikciju NBA drafta. Njihova najveća vrednost ne leži u tome da zamene ljudsku procenu, već da je ojačaju, omogućavajući organizacijama da donose pametnije odluke zasnovane na podacima.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje nije dobilo eksterno finansiranje.

LITERATURA

Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics, 2(4), 433-459.

Boyd, T., & Shropshire, K. L. (Eds.). (2000). *Basketball Jones: America above the rim*. NYU Press.

Boyd, T. (2008). *Young, Black, rich, and famous: The rise of the NBA, the hip hop invasion, and the transformation of American culture*. U of Nebraska Press.

Brodersen, K. H., Ong, C. S., Stephan, K. E., & Buhmann, J. M. (2010, August). The balanced accuracy and its posterior distribution. In *2010 20th international conference on pattern recognition* (pp. 3121-3124). IEEE.

Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, *16*, 321-357. (Chawla et al., 2002)

Chiba, N. (2012). Globalisation and management of the National Basketball Association since the 1980s. *International Journal of Sport Management and Marketing*, *11*(3-4), 143-157.

Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC genomics*, *21*, 1-13.

Davis, J., & Goadrich, M. (2006, June). The relationship between Precision-Recall and ROC curves. In *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning* (pp. 233-240).

Hosick, M. B., & Sproull, N. (2012). NCAA: Eligibility and Success. *Journal of College Admission*, *217*, 31-33.

Ivanović, B. (1977). Classification theory. *Institute for Industrial Economic, Belgrade*, 171-200.

Johnston, K., Farah, L., Ghuman, H., & Baker, J. (2022). To draft or not to draft? A systematic review of North American sports' entry draft. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *32*(1), 4-17.

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *374*(2065), 20150202.

Katz, M., Pfleegor, A. G., Schaeperkoetter, C., & Bass, J. (2015). Factors for success in NCAA Division III athletics. *Journal of Issues in Intercollegiate Athletics*, *8*(1), 3.

Kubatko, J., Oliver, D., Pelton, K., & Rosenbaum, D. T. (2007). A starting point for analyzing basketball statistics. *Journal of quantitative analysis in sports*, *3*(3).

Oliver, D. (2004). *Basketball on paper: rules and tools for performance analysis*. U of Nebraska Press.

Powers, D. M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *arXiv preprint arXiv:2010.16061*.

Saito, T., & Rehmsmeier, M. (2015). The precision-recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary classifiers on imbalanced datasets. *PloS one*, *10*(3), e0118432.

Schumaker, R. P., Solieman, O. K., Chen, H., Schumaker, R. P., Solieman, O. K., & Chen, H. (2010). Predictive modeling for sports and gaming. *Sports data mining*, 55-63.

Silk, M. L., & Andrews, D. L. (2012). *Sport and neoliberalism: Politics, consumption, and culture*. Temple University Press.

Staw, B. M., & Hoang, H. (1995). Sunk costs in the NBA: Why draft order affects playing time and survival in professional basketball. Administrative Science Quarterly, 474-494.

Szymanski, S. (2010). The political economy of sport. In *The comparative economics of sport* (pp. 79-86). London: Palgrave Macmillan UK.

Teramoto, M., Cross, C. L., Rieger, R. H., Maak, T. G., & Willick, S. E. (2018). Predictive validity of national basketball association draft combine on future performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *32*(2), 396-408.

Thelin, J. R. (1996). *Games colleges play: Scandal and reform in intercollegiate athletics*. JHU Press.

Torvik, B. (n.d.). T-Rank: NCAA team and player statistics database. BartTorvik.com. https://barttorvik.com/

DRAFT V

VEŠTAČKA INTELIGENCIJA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

PRIMENA VELIKIH JEZIČKIH MODELA U NAUČNOM ISTRAŽIVANJU

APPLICATION OF LARGE LANGUAGE MODELS IN SCIENTIFIC RESEARCH

MILOŠ ŽIVADINOVIĆ[1], DEJAN SIMIĆ[2]

[1] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, mzdv@protonmail.com, 0000-0002-0342-340X
[2] Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, dsimic@fon.bg.ac.rs, 0000-0002-0744-5411

Rezime: *Veliki jezički modeli predstavljaju prekretnicu u naučnim istraživanjima, omogućavajući unapređivanje procesa analize i obrade tekstualnih podataka. Ovaj rad predstavlja deskriptivnu analizu primene velikih jezičkih modela u tehničkim naukama, sa fokusom na metodologije inženjeringa upita i generisanja sadržaja prikupljanjem. Hronološki pregled razvoja od 2022. do 2025. godine pokazuje evoluciju od eksperimentalnih alata do nezaobilaznih komponenti istraživačke infrastrukture. Stopa upotrebe u računarskim naukama dostigla je 17,5%, sa projekcijom rasta na 40-50% do kraja 2025. godine. Ključni rezultati ukazuju na uštedu vremena od 37% uz poboljšanje kvaliteta od 18% u akademskim zadacima. Specijalizovani veliki jezički modeli nadmašuju ljudsku ekspertizu - BrainGPT postiže 86% tačnosti u predviđanju neurobioloških eksperimenata nasuprot 63% kod eksperata. Metodološke inovacije omogućile su dramatičnu redukciju halucinacija sa 39,6% (GPT-3.5) na 28,6% (GPT-4), dok najnoviji modeli postižu stope halucinacija ispod 1%. Komparativna analiza pokazuje da GPT-4o vodi sa 90,2% na MMLU merenjima, Claude 3.5 Sonnet prednjači u kodiranju sa 92,1%, dok Gemini 2.0 Flash postiže najnižu stopu halucinacija od 0,7%. Analiza obuhvata automatizovani pregled literature, kategorizaciju apstrakata, podršku u pisanju rukopisa, i autonomne istraživačke sisteme. Rad identifikuje izazove poput halucinacija i etičkih pitanja, preporučujući hibridne pristupe i standardizovane protokole za evaluaciju.*

Ključne reči: *Veliki jezički modeli, inženjering upita, generisanje sadržaja prikupljanjem, naučna istraživanja.*

Abstract*: Large language models represent a turning point in scientific research, enabling improvement of analysis and processing of textual data. This paper presents a descriptive analysis of the application of Large Language Models in technical sciences, with a special focus on the methodologies of prompt engineering and retrieval augmented generation. Chronological overview of development from 2022 until 2025 shows the evolution of Large Language Models from experimental tools to unavoidable components of research infrastructure. The adoption rate in computer science reached 17.5%, with a growth projection of 40-50% until the end of 2025. Key results indicate 37% time savings with 18% quality improvement in academic tasks. Specialized Large Language Models surpass human expertise - BrainGPT achieves 86% accuracy in predicting neurobiological experiments versus 63% by human experts. Methodological innovations have enabled dramatic reduction of hallucinations from 39.6% (GPT-3.5) to 28.6% (GPT-4), while the latest models achieve hallucination rates below 1%. Comparative analysis shows GPT-4o leading with 90.2% on MMLU benchmark, Claude 3.5 Sonnet excelling in coding with 92.1%, while Gemini 2.0 Flash achieves the lowest hallucination rate of 0.7%. The analysis includes automated literature review, abstract categorization, manuscript writing support, and autonomous research systems. The paper identifies challenges such as hallucinations and ethical issues, recommending hybrid approaches and standardized evaluation protocols.*

Keywords: *Large Language Models, prompt engineering, retrieval augmented generation, scientific research.*

1. UVOD

Veliki jezički modeli (VJM; u originalnom značenju LLM – Large Language Models) predstavljaju tehniku veštačke inteligencije koja omogućava promenu vršenja naučnih istraživanja u tehničkim naukama. Ovakva primena neuronskih mreža, uključujući javno dostupne modele poput GPT-4, Claude-3, LLaMA, Gemini i drugih, demonstriraju izuzetne sposobnosti u razumevanju i generisanju prirodnog jezika na nivou koji često prevazilazi ljudske eksperte (Luo et al., 2024). Značaj velikih jezičkih modela za savremena naučna

istraživanja ogleda se u njihovoj sposobnosti da autonomno planiraju eksperimente, generišu hipoteze, analiziraju podatke i izrađuju naučne radove (Lu et al., 2024).

Trenutno stanje usvajanja velikih jezičkih modela u akademskim krugovima pokazuje rast sa stopom usvajanja od 17,5% u radovima iz računarskih nauka i 6,3% u prirodnim naukama (Liang et al., 2024). Ova ekspanzija menja tradicionalne procese naučnog istraživanja kroz tri ključne oblasti: akademsko pisanje i kreiranje sadržaja, gde veliki jezički modeli omogućavaju automatizaciju pregleda literature i poboljšanje kvaliteta naučnih tekstova; metodologiju istraživanja, kroz napredne tehnike poput inženjeringa upita (prompt engineering) (Velásquez-Henao et al., 2023) i sistema za prošireno generisanje sa pretragom (PGP; u originalnom značenju Retrieval-Augmented Generation - RAG) (Gao et al., 2023); i autonomno planiranje naučnih eksperimenata (Boiko et al., 2023).

Tehnološke inovacije u primeni rešenja VJM za naučno istraživanje fokusiraju se na tri glavne metodologije: inženjering upita koji omogućava precizno usmeravanje modela za specifične naučne zadatke kroz tehnike poput Chain-of-Thought (Wei et al., 2022) i Tree-of-Thought (Yao et al., 2023) pristupa; PGP sisteme koji kombinuju mogućnosti LLM-a sa pristupom naučnim bazama podataka u stvarnom vremenu za tačne i ažurne informacije; i specijalizovano podešavanje (fine-tuning) modela za specifične naučne domene korišćenjem tehnika poput LoRA (Low-Rank Adaptation) (Hu et al., 2021).

Cilj ovog rada je da pruži deskriptivni pregled primene VJM u naučnom istraživanju, sa posebnim fokusom na tehničke nauke i savremene metodološke pristupe. Rad sistematski analizira trenutne mogućnosti i ograničenja tehnologija VJM, identifikuje efektivne pristupe za njihovu integraciju u istraživačke procese, i pruža praktične smernice za implementaciju u akademskim okruženjima.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Evolucija tehnologija VJM u akademskom kontekstu

Hronološki razvoj velikih jezičkih modela u akademskom okruženju može se podeliti u tri jasno definisane faze. Prva faza označila je početak eksperimentalne upotrebe, kada je Meta AI objavila LLaMA kao rešenje otvorenog koda (Touvron et al., 2023) za istraživačke ustanove, omogućavajući jednostavnost pristupa VJM. Međutim, najznačajniji trenutak bio je lansiranje ChatGPT-a 30. novembra 2022. godine, koji je pokrenuo masovnu adopciju tehnologija VJM u akademskim krugovima (Liang et al., 2024).

Druga faza predstavljala je period ubrzane integracije, kada je uveden u upotrebu GPT-4 model sa multimodalnim sposobnostima (OpenAI, 2023) i VJM Claude razvijen od kompanije Anthropic (*Claude 2*, 2023, p. 2), fokusiran na sigurnost i povećanim stepenom akademske upotrebljivosti. Tokom 2025. godine, stopa usvajanja VJM je porasla sa manje od 5% na 6,3% u časopisima izdavača Nature, odnosno na 17,5% u oblasti računarskih nauka (Liang et al., 2024). Treća faza donela je specijalizaciju, sa objavljivanjem Claude 3 (*Introducing the next Generation of Claude*, 2024, p. 3) porodice modela optimizovanih za akademsko pisanje i GPT-4o modela (*Hello GPT-4o*, 2024) od strane kompanije OpenAI.

Ključni tehnološki napredak ogleda se u poboljšanju preciznosti – GPT-4 pokazuje značajno poboljšanje tačnosti u odnosu na GPT-3.5 (OpenAI, 2023), dok je Claude 3 postigao bolje performanse u tačnosti prilikom obrade akademskog sadržaja (Zhao et al., 2025, p. 202).

2.2. Trenutno stanje primene u naučnim disciplinama

Analiza upotrebe tehnologija VJM kroz različite naučne discipline otkriva razlike u stopama usvajanja i načinima implementacije. Tehničke nauke prednjače u usvajanju, sa računarskim naukama koje beleže 17.5% stvaranja sadržaja pomoću VJM, dok inženjerske discipline pokazuju visoki stepen usvajanja, a prirodne nauke beleže umeren do visoki stepen usvajanja, sa fizikom i srodnim naukama koje pokazuje nižu stopu usvajanja (Eloundou et al., 2023). Prirodne nauke pokazuju stepen usvajanja od 18-22%, dok fizika beleži stopu usvajanja od 10%.

Za razliku od tehničkih nauka, druge naučne oblasti pokazuju umeren do nizak stepen usvajanja. Matematika ima najnižu stopu usvajanja među STEM poljima sa samo 3,5%, dok biologija i medicina beleže usvajanje od 6,3% do 11%. Ova razlika može se objasniti različitim nivoima komfora sa tehnologijama VJM – akademski istraživači iz oblasti računarskih nauka iskazuju značajno veću spremnost za otkrivanje upotrebe VJM u poređenju sa istraživačima iz društvenih nauka.

Istraživanje sprovedeno na 816 verifikovanih autora naučnih radova pokazuje značajan procenat istraživača koristi VJM u svom radu, sa većinom koja izjavljuje da ovi alati poboljšavaju kvalitet njihovog rada (Zhang

et al., 2023). Demografski podaci otkrivaju da veću upotrebu beleže mlađi istraživači, organizacije sa manje zaposlenih, i istraživači kojima engleski nije maternji jezik.

2.3. Ključna istraživanja iz perioda 2022-2025

Empirijska dokazi o efikasnosti VJM u akademskom istraživanju potvrđuje njihov potencijal. Istraživanje BrainGPT objavljeno u Nature Human Behaviour pokazalo je da VJM postižu 81,4% preciznosti u predviđanju rezultata studija iz oblasti neuronauke, značajno nadmašujući ljudske eksperte sa 63,4% preciznosti (Luo et al., 2024).

Eksperimentalna studija sprovedena na uzorku od 444 učesnika pokazala je merljiva poboljšanja u efikasnosti: učesnici koji su koristili ChatGPT završavali su zadatke pisanja u proseku 37% brže uz 18% poboljšanje kvaliteta rezultata, za razliku od učesnika koji nisu koristili ChatGPT. Studija je takođe pokazala da su najveće prednosti imali učesnici sa slabijim veštinama pisanja, što ukazuje na potencijal generativne veštačke inteligencije za smanjivanje nejednakosti u produktivnosti i demokratizaciju pristupa visokokvalitetnom pisanju (Noy & Zhang, 2023).

Komparativna analiza različitih VJM otkriva značajne razlike u performansama na standardizovanim merenjima. Jedan od načina poređenja različitih VJM rešenja je putem MMLU (Massive Multitask Language Understanding) merenja (Hendrycks et al., 2021) koje obuhvata skup pitanja i zadataka iz različitih oblasti. Na MMLU merenju (Vals AI, 2025), GPT-4o postiže najviše rezultate sa 90,2% tačnosti, potvrđujući svoj primat u multimodalnim zadacima (Liang et al., 2024). Claude 3.5 Sonnet beleži 85,0% na MMLU merenju, ali se izdvaja performansama u kodiranju sa 92,1% preciznosti na HumanEval merenju, što ga čini preferiranim izborom za tehničke zadatke (*Introducing the next Generation of Claude*, 2024). Gemini 2.0 Flash model, iako postiže 77,4% na MMLU merenju, postavlja novi standard za pouzdanost sa niskom stopom halucinacija od samo 0,7%, što predstavlja napredak u preciznosti VJM rešenja (Tilawat, 2025). LLaMA 3.1 70B model ostvaruje rezultate sa 79,3% uspešnosti na MMLU merenju i 66,4% u kodiranju, potvrđujući dodatnu vrednost pristupa otvorenog koda (Cotton, 2024). Zanimljivo je da specijalizovani 124M-parametarski GPT-2 model treniran na literaturi iz oblasti neuronauke postiže 81,4% preciznosti u domensko-specifičnim zadacima sa stopom halucinacija od 12,0%, što demonstrira važnost optimizacije nad veličinom modela (Luo et al., 2024).

2.4. Identifikovani izazovi i ograničenja

Tehnologije VJM se suočavaju sa značajnim izazovima koji ograničavaju njihovu punu primenu u naučnom istraživanju. Problem halucinacija predstavlja najveći izazov - ChatGPT generiše značajan procenat nepostojećih referenci, dok Google Bard pokazuje još veću sklonost ka generisanju lažnih referenci prilikom sistematskih pregleda (Alkaissi et al., 2023).

Etička razmatranja postavljaju dodatne izazove. Tekstovi generisani od strane ChatGPT uspešno izbegavaju tradicionalne detektore plagijarizma poput sistema Turnitin, čime se stvara novi način za prevazilaženje ograničenja akademske čestitosti. Institucije pokazuju mešovite pristupe - neki univerziteti su zabranili upotrebu ChatGPT-a, dok drugi ohrabruju transparentnu upotrebu uz prikladno obeležavanje generisanog sadržaja (Nahar et al., 2025).

Tehnička ograničenja uključuju velike računske zahteve - obuka LLaMA 3.1 405B modela košta preko 640 miliona dolara samo za hardver (više od 16.000 H100 GPU-ova po ceni od $25.000-$40.000 po komadu), ne uključujući troškove struje, hlađenja, infrastrukture i osoblja tokom meseci obuke (Cotton, 2024; *Meta Intros Its Biggest Open Source AI Model*, n.d.). Ova ograničenja stvaraju nejednakost u pristupu između istraživačkih ustanova.

3. METODOLOGIJA PRIMENE VJM U NAUČNOM ISTRAŽIVANJU

Primena velikih jezičkih modela u naučnom istraživanju zasniva se na nekoliko ključnih metodoloških pristupa koji omogućavaju efikasno korišćenje njihovih sposobnosti za specifične akademske zadatke. Dva dominantna pristupa - inženjering upita (prompt engineering) i generisanje sadržaja prikupljanjem (Retrieval-Augmented Generation - RAG).

3.1. Inženjering upita (Prompt Engineering)

Inženjering upita predstavlja disciplinu oblikovanja tekstualnih instrukcija koje usmeravaju VJM ka ostvarivanju naučnih zadataka. Ova metodologija se zasniva na razumevanju da kvalitet i struktura ulaznih instrukcija direktno utiču na relevantnost, tačnost i korisnost generisanih odgovora (Wei et al., 2022). U kontekstu naučnog istraživanja, efikasan inženjering upita omogućava transformaciju VJM od opštih jezičkih alata u specijalizovane alate sposobne za kompleksnu analizu i zaključivanje.

DRAFT VERSION

Chain-of-Thought (CoT) pristup predstavlja inovaciju u domenu inženjeringa upita za naučne aplikacije. Ovaj pristup omogućava VJM da eksplicitno demonstrira svoj proces razmišljanja kroz korake (Wei et al., 2022). Praktična implementacija CoT-a u tehničkim naukama uključuje instrukcije poput "Analiziraj ovaj eksperimentalni dizajn korak po korak, identifikujući ključne varijable, potencijalne probleme, i metodološka ograničenja." Ovakav pristup omogućava istraživačima da prate logiku VJM i potvrde kvalitet analitičkih procesa.

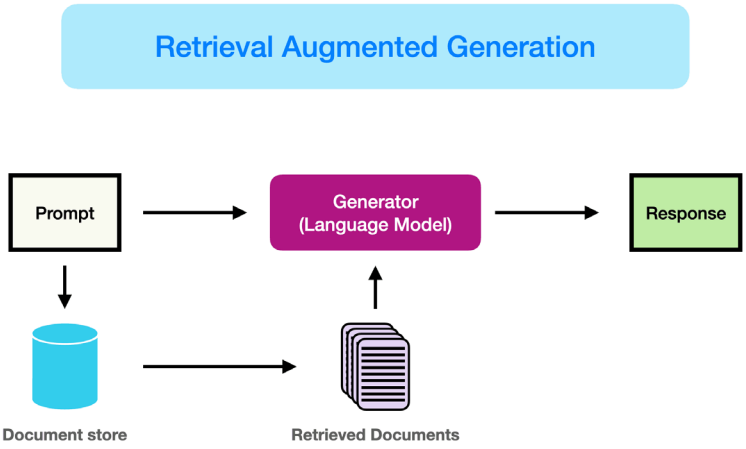
Napredne tehnike inženjeringa upita uključuju few-shot learning (Snell et al., 2017) pristupe, gde se VJM-u pružaju konkretni primeri željenog tipa analize pre postavljanja glavnog zadatka, samim time usmeravajući tok rada LLM-a.

Zero-shot (Vöge et al., 2024) tehnike omogućavaju primenu VJM na nove naučne domene bez potrebe za naprednom obukom. Ova metodologija se oslanja na formulisane instrukcije koje eksplicitno definišu kontekst, očekivanja i kriterijume za evaluaciju. Primer efikasnog zero-shot upita za analizu naučne literature: "Kao ekspert u oblasti [specifična oblast], analiziraj sledeći rad identifikujući: (1) glavnu hipotezu, (2) metodološki pristup, (3) ključne nalaze, (4) ograničenja studije, i (5) implikacije za buduća istraživanja."

3.2. Sistemi za prošireno generisanje sa pretragom (PGP; RAG)

Sistemi za prošireno generisanje sa pretragom predstavljaju hibridni pristup koji kombinuje mogućnosti VJM sa pristupom verifikovanim spoljašnjim izvorima znanja, rešavajući probleme halucinacija i zastarelosti informacija (Lewis et al., 2021). U kontekstu naučnog istraživanja, PGP sistemi omogućavaju VJM da pristupe naučnoj literaturi, specijalizovanim bazama podataka, i verifikovanim eksperimentalnim rezultatima bez ponovne obuke modela, značajno poboljšavajući tačnost i kredibilitet generisanog sadržaja.

Arhitektura sistema PGP za naučne primene sastoji se od tri ključne komponente: modul za prikupljanje koji pretražuje relevantne dokumente iz odabranih naučnih baza od strane korisnika, sistem rangiranja koji vrši rangiranje prikupljenog sadržaja, i modul koji sintetiše informacije u potpun odgovor. Specifično za tehničke nauke, ovi sistemi često integrišu specijalizovane baze poput PubMed, arXiv, IEEE Xplore, ili Google Scholar, omogućavajući pristup najnovijim naučnim publikacijama i tehničkim standardima.



Slika 1: Prikaz koraka PGP (Retrieval Augmented Generation (RAG) for LLMs – Nextra, 2025)

Praktična primena sistema PGP u tehničkim naukama demonstrirana je kroz projekte poput automatizovane analize naučnih trendova, gde sistem kombinuje pretraživanje kroz hiljadu najnovijih publikacija sa VJM kako bi identifikovao nove teme istraživanja i potencijalne istraživačke pravce. Ovakvi sistemi pokazuju značajno poboljšanje tačnosti kroz redukciju halucinacija u poređenju sa standardnim VJM pristupima (Shuster et al., 2021).

Optimizacija RAG sistema za specifične naučne domene zahteva podešavanje embedding modela (Khanna & Subedi, 2024) koji pretvaraju tekstualni sadržaj u numeričke vrednosti neophodne za efikasno pretraživanje. Domensko-specifična obuka na naučnoj literaturi omogućava bolje semantičko razumevanje tehničke terminologije i konceptualnih povezanosti, što rezultuje relevantnijim pretraživanjem i kvalitetnijim rezultatima.

Hibridni pristupi kombinuju PGP sa tehnikama inženjeringa upita, čineći postupak formulisanja upita za usmeravanje PGP ka relevantnim izvorima. Ovaj pristup je posebno efikasan za istraživanja koja zahtevaju sintezu informacija iz različitih naučnih disciplina.

Evaluacija performansi PGP sistema u naučnom kontekstu zahteva višedimenzionalne metrike koje uključuju tačnost, preciznost citata, aktuelnost informacija, i konzistentnost sa naučnim konsenzusom. Studije pokazuju da optimizovani PGP sistemi nadmašuju VJM pristupe u tačnosti generisanja naučnih apstrakata (Gao et al., 2023).

4. ZAKLJUČAK

Analiza primene VJM u naučnom istraživanju tokom perioda 2022-2025 potvrđuje transformaciju VJM od eksperimentalnih alata do nezaobilaznih komponenti savremenog istraživačkog postupka u tehničkim naukama. Metodološke inovacije poput naprednog inženjeringa upita i sistema za generisanje sadržaja prikupljanjem omogućile su značajnu redukciju halucinacija i poboljšanje tačnosti, dok kvantifikovane studije pokazuju povećanje produktivnosti do 37% u akademskim zadacima.

Sposobnost specijalizovanih VJM da nadmaše ljudsku ekspertizu u određenim naučnim domenima označava prelaz VJM iz uloge alata u ulogu komplementarnih istraživačkih partnera.

Hibridni metodološki okvir koji kombinuje inženjering upita sa RAG sistemima pokazuje najveću efikasnost za kompleksne istraživačke zadatke, omogućavajući domensko-specifično podešavanje kroz optimizaciju embedding modela i semantičko razumevanje tehničke terminologije.

Preporuke za istraživače fokusiraju se na tri ključne oblasti: prvo, razvijanje smernica koje definišu etičke standarde i protokole za obelodanjivanje upotrebe veštačke inteligencije; drugo, usvajanje hibridnih pristupa koji kombinuju VJM mogućnosti sa procesima poput PGP; treće, kontinuirana edukacija o tehnikama inženjeringa upita i PGP sistema kako bi se iskoristio potencijal ovih tehnologija uz održavanje svesti o ograničenjima poput preseka znanja i algoritamskih pristrasnosti.

LITERATURA

Alkaissi, H., McFarlane, S. I., Alkaissi, H., & McFarlane, S. I. (2023). Artificial Hallucinations in ChatGPT: Implications in Scientific Writing. *Cureus*, *15*(2). https://doi.org/10.7759/cureus.35179

Boiko, D. A., MacKnight, R., Kline, B., & Gomes, G. (2023). Autonomous chemical research with large language models. *Nature*, *624*(7992), 570–578. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06792-0

Claude 2. (2023, July 11). https://www.anthropic.com/news/claude-2

Cotton, R. (2024, July 23). *What Is Meta's Llama 3.1 405B? How It Works, Use Cases & More*. DataCamp. https://www.datacamp.com/blog/llama-3-1-405b-meta-ai

Eloundou, T., Manning, S., Mishkin, P., & Rock, D. (2023). *GPTs are GPTs: An Early Look at the Labor Market Impact Potential of Large Language Models* (No. arXiv:2303.10130). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.10130

Gao, Y., Xiong, Y., Gao, X., Jia, K., Pan, J., Bi, Y., Dai, Y., Sun, J., Wang, M., & Wang, H. (2023, December 18). *Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey*. arXiv.Org. https://arxiv.org/abs/2312.10997v5

Hello GPT-4o. (2024, May 13). https://openai.com/index/hello-gpt-4o/

Hendrycks, D., Burns, C., Basart, S., Zou, A., Mazeika, M., Song, D., & Steinhardt, J. (2021). *Measuring Massive Multitask Language Understanding* (No. arXiv:2009.03300). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.03300

Hu, J. E., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., & Chen, W. (2021). LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models. *ArXiv*. https://www.semanticscholar.org/paper/LoRA%3A-Low-Rank-Adaptation-of-Large-Language-Models-Hu-Shen/a8ca46b171467ceb2d7652fbfb67fe701ad86092

Introducing the next generation of Claude. (2024, March 4). https://www.anthropic.com/news/claude-3-family

Khanna, S., & Subedi, S. (2024). *Tabular Embedding Model (TEM): Finetuning Embedding Models For Tabular RAG Applications* (No. arXiv:2405.01585). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.01585

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2021). *Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks* (No. arXiv:2005.11401). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.11401

Liang, W., Zhang, Y., Wu, Z., Lepp, H., Ji, W., Zhao, X., Cao, H., Liu, S., He, S., Huang, Z., Yang, D., Potts, C., Manning, C. D., & Zou, J. Y. (2024). *Mapping the Increasing Use of LLMs in Scientific Papers* (No. arXiv:2404.01268). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.01268

DRAFT VERZIJA

Lu, C., Lu, C., Lange, R. T., Foerster, J., Clune, J., & Ha, D. (2024). *The AI Scientist: Towards Fully Automated Open-Ended Scientific Discovery* (No. arXiv:2408.06292). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.06292

Luo, X., Rechardt, A., Sun, G., Nejad, K. K., Yáñez, F., Yilmaz, B., Lee, K., Cohen, A. O., Borghesani, V., Pashkov, A., Marinazzo, D., Nicholas, J., Salatiello, A., Sucholutsky, I., Minervini, P., Razavi, S., Rocca, R., Yusifov, E., Okalova, T., … Love, B. C. (2024). Large language models surpass human experts in predicting neuroscience results. *Nature Human Behaviour*, *9*(2), 305–315. https://doi.org/10.1038/s41562-024-02046-9

Meta intros its biggest open source AI model: Llama 3.1 405B | TechTarget. (n.d.). Search Enterprise AI. Retrieved June 21, 2025, from https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/news/366596503/Meta-intros-its-biggest-open-source-AI-model-Llama-31-405B

Nahar, M., Lee, S., Guillen, R., & Lee, D. (2025). *Generative AI Policies under the Microscope: How CS Conferences Are Navigating the New Frontier in Scholarly Writing* (No. arXiv:2410.11977). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.11977

Noy, S., & Zhang, W. (2023). Experimental evidence on the productivity effects of generative artificial intelligence. *Science*, *381*(6654), 187–192. https://doi.org/10.1126/science.adh2586

OpenAI. (2023). *GPT-4 Technical Report* (No. arXiv:2303.08774). arXiv. http://arxiv.org/abs/2303.08774

Retrieval Augmented Generation (RAG) for LLMs – Nextra. (2025, June 7). https://www.promptingguide.ai/research/rag

Shuster, K., Poff, S., Chen, M., Kiela, D., & Weston, J. (2021). Retrieval Augmentation Reduces Hallucination in Conversation. In M.-F. Moens, X. Huang, L. Specia, & S. W. Yih (Eds.), *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2021* (pp. 3784–3803). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/2021.findings-emnlp.320

Snell, J., Swersky, K., & Zemel, R. S. (2017). *Prototypical Networks for Few-shot Learning* (No. arXiv:1703.05175). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.05175

Tilawat, M. (2025, April 18). AI Hallucination Report 2025: Which AI Hallucinates the Most? *All About AI*. https://www.allaboutai.com/resources/ai-statistics/ai-hallucinations/

Touvron, H., Lavril, T., Izacard, G., Martinet, X., Lachaux, M.-A., Lacroix, T., Rozière, B., Goyal, N., Hambro, E., Azhar, F., Rodriguez, A., Joulin, A., Grave, E., & Lample, G. (2023). *LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models* (No. arXiv:2302.13971). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.13971

Vals AI. (2025, April 15). *MMLU Pro Benchmark*. https://www.vals.ai/

Velásquez-Henao, J. D., Franco-Cardona, C. J., & Cadavid-Higuita, L. (2023). Prompt Engineering: A methodology for optimizing interactions with AI-Language Models in the field of engineering. *DYNA*, *90*(230), 9–17. https://doi.org/10.15446/dyna.v90n230.111700

Vöge, L., Gurgul, V., & Lessmann, S. (2024). *Leveraging Zero-Shot Prompting for Efficient Language Model Distillation* (No. arXiv:2403.15886). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.15886

Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Chi, E., Xia, F., Le, Q., & Zhou, D. (2022). Chain of Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models. *ArXiv*. https://www.semanticscholar.org/paper/Chain-of-Thought-Prompting-Elicits-Reasoning-in-Wei-Wang/1b6e810ce0afd0dd093f789d2b2742d047e316d5

Yao, S., Yu, D., Zhao, J., Shafran, I., Griffiths, T. L., Cao, Y., & Narasimhan, K. (2023). *Tree of Thoughts: Deliberate Problem Solving with Large Language Models*. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2305.10601

Zhang, C., Zhang, C., Li, C., Qiao, Y., Zheng, S., Dam, S. K., Zhang, M., Kim, J. U., Kim, S. T., Choi, J., Park, G.-M., Bae, S.-H., Lee, L.-H., Hui, P., Kweon, I. S., & Hong, C. S. (2023). *One Small Step for Generative AI, One Giant Leap for AGI: A Complete Survey on ChatGPT in AIGC Era* (No. arXiv:2304.06488). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06488

Zhao, W. X., Zhou, K., Li, J., Tang, T., Wang, X., Hou, Y., Min, Y., Zhang, B., Zhang, J., Dong, Z., Du, Y., Yang, C., Chen, Y., Chen, Z., Jiang, J., Ren, R., Li, Y., Tang, X., Liu, Z., … Wen, J.-R. (2025). *A Survey of Large Language Models* (No. arXiv:2303.18223). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.18223

DRAFT VERSION

VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA I OPTIMIZACIJA

DRAFT VERZIJA

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

ФОН
UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Оригинални чланак

ХИБРИДНИ ПРИСТУП ОПТИМИЗАЦИЈИ ЈЕЛОВНИКА У ВОЈНОЈ АКАДЕМИЈИ ПРИМЕНОМ „ГРУБИХ БРОЈЕВА”

HYBRID APPROACH TO MENU OPTIMIZATION AT THE MILITARY ACADEMY THROUGH THE APPLICATION OF “ROUGH NUMBERS”

СЛАВИША АРСИЋ[1], ДРАГАН ПАМУЧАР[2], МИЉОЈКО ЈАНИШЕВИЋ[3]

[1] Универзитет одбране у Београду, Војна академија, Београд, arsic.slavisa@gmail.com, 0000-0001-7431-7308
[2] Универзитет у Београду, Факултет организационих наука, Београд, dpamucar@gmail.com, 0000-0001-8522-1942
3 Универзитет Унион – Никола Тесла, Факултет за пословне студије и право, Београд,, miljojko.janosevic@fpsp.edu.rs, 0000-0001-9202-8649

Резиме: *У раду је представљена практична методологија за унапређење процеса планирања исхране, која омогућава објективну процену прихватљивости јела и предвиђа израду адекватних заменских оброка. Овај алат, уз минимизовање субјективизма, подржава рад стручних служби у креирању јеловника који су усклађени са нутритивним потребама и реалним преференцама корисника. Методологија се може применити у различитим условима, како у контексту дугорочног одржавања оперативне способности припадника система одбране, тако и другим организационим системима који организују колективну исхрану (образовне институције, здравствене установе, корпоративне кантине и други) – уколико адаптирају критеријуме властитим потребама. Представљени резултати имају за циљ да илуструју како структурисан и научно утемељен приступ може допринети одрживом унапређењу система колективне исхране, као и да поставе основу за будуће интервенције и даље оптимизације.*

Кључне речи: *Оптимизација менија, колективна исхрана, Војна академија, Best-Worst метода, R'MAIRCA метода.*

Abstract: *The paper presents a practical methodology for improving the process of nutrition planning, which enables an objective assessment of the acceptability of dishes and foresees the creation of adequate substitute meals. This tool, while minimizing subjectivism, supports the work of expert services in creating menus that are aligned with the nutritional needs and real preferences of users. The methodology can be applied in different conditions, both in the context of long-term maintenance of the operational capability of members of the defense system, and in other organizational systems that organize collective nutrition (educational institutions, healthcare institutions, corporate canteens, and others) – if they adapt the criteria to their own needs. The presented results aim to illustrate how a structured and scientifically grounded approach can contribute to the sustainable improvement of the collective nutrition system, as well as to set the foundation for future interventions and further optimizations.*

Keywords: *Menu optimization, collective nutrition, Military Academy, Best-Worst method, R'MAIRCA method.*

1. УВОД

Храна управља биохемијским процесима на ћелијском нивоу, подстиче вољу и позитиван ток мисли, смирује напетост и подиже расположење.Свако одступање од нутритивне и енергетске равнотеже у исхрани доводи до преобилне или недовољне исхране која се услед разних метаболичких поремећаја и дегенеративних обољења негативно одражава на здравље и психофизичку кондицију организма, радну способност и животни век појединца. Бројне епидемиолошке студије показале су да је храна у 70 - 90% случајева кључни чинилац који проузрокује или поспешује цивилизацијске болести (Nedeljko Jokić, 2004).

DRAFT VERZIJA

Правилним планирањем и реализацијом колективне исхране (производни погони, здравствене установе, образовне институције, војска, полиција и др.) омогућава се изградња потребних способности појединца и колектива за остварење прокламованих краткорочних, средњорочних и дугорочних циљева организације који исходе из интереса шире друштвене заједнице и утичу на стабилност и развој државе у целини.

Појачана напрезања припадника ВС и МО због усвајања нових мисија и задатака, промене навика у исхрани (нарочито млађих категорија лица), услова на тржишту прехрамбених производа (доступност, нутритивне и сензорне карактеристике услед сезонских утицаја, начина производње и географског порекла) и развој ефикаснијих технолошких процеса за припрему и дистрибуцију хране, намећу потребу за усклађивањем јеловника са потребама корисника како би се побољшало задовољство исхраном и елиминисали трошкови настали бацањем хране.

Приказана методологија представља алат којим се може на објективан и ефикасан начин, минимизирајући субјективизам искуствене процене стручних органа Интендантске службе (ИнСл) који су задужени за израду функционалног јеловника у свим околностима, вршити планирање исхране и припрема адекватних заменских јела (модификовањем постојећих на основу Норми замене Плана исхране или креирањем нових са адекватним перформансама која обезбеђују програмиран унос нутријената) која ће бити искоришћена и испунити циљеве исхране.

Хибридни BWM-R'MAIRCA модел структуриран је у две основне фазе:

(1) примена „Best-Worst" методологије (BWM) (Rezaei, 2015, 2016) за прорачун тежинских коефицијената критеријума и

(2) евалуација алтернатива (менија) уз коришћење оригиналне модификације MAIRCA методе (Pamučar et al., 2014) засноване на концепту „грубих бројева", R'MAIRCA (Rough Multi-Attribute Ideal-Real Comparative Analysis).

У првој фази модела, на основу претходно прикупљених процена, применом BWM извршена је објективна и систематска интеграција експертских увида, чиме је омогућено прецизно одређивање значаја појединачних критеријума у процесу одлучивања. Друга фаза обухвата рангирање алтернатива на основу дефинисаних критеријума.

R'MAIRCA метода је изабрана због својих бројних предности:

(1) структура математичког модела остаје постојана независно од броја укључених алтернатива и критеријума;

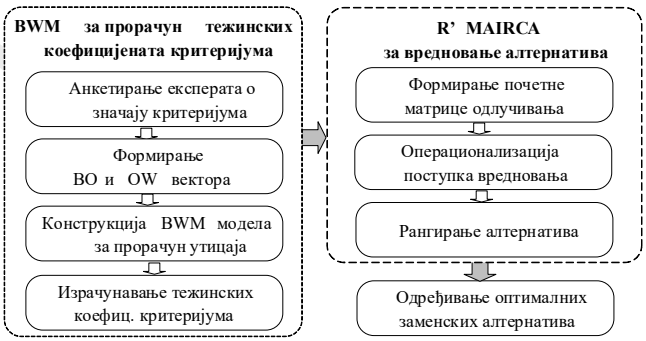
(2) погодна је за анализу великог броја алтернатива и критеријума;

(3) пружа јасно дефинисан ранг алтернатива изражен бројчаним вредностима, што олакшава интерпретацију резултата;

(4) примењива је на квалитативне и квантитативне критеријуме и

(5) осигурава објективност рангирања узимајући у обзир унапред дефинисани праг доминације (Pamučar et al., 2014).

Илустрација уопштених корака хибридног BWM-R'MAIRCA модела, графички је представљена на Слици 1. Алгоритам примене BWM и R'MAIRCA истиче методолошки оквир модела и биће детаљно изложен у наредном делу, уз посебан акценат на механизме интеграције тежинских коефицијената и технике рангирања алтернатива.



Слика 1: Хибридни BWM-R'MAIRCA модел

Након што се сваком јелу додели одговарајући ранг, постојећа јела се замењују њиховим најближим вишерангираним заменским суседима. Овај приступ омогућава да пожељније заменске алтернативе, са сензорним перформансама у складу са очекивањима корисника, унапреде корисност припремљених оброка, задовољство корисника и укупне перформансе јеловника, уз истовремено очување вредности

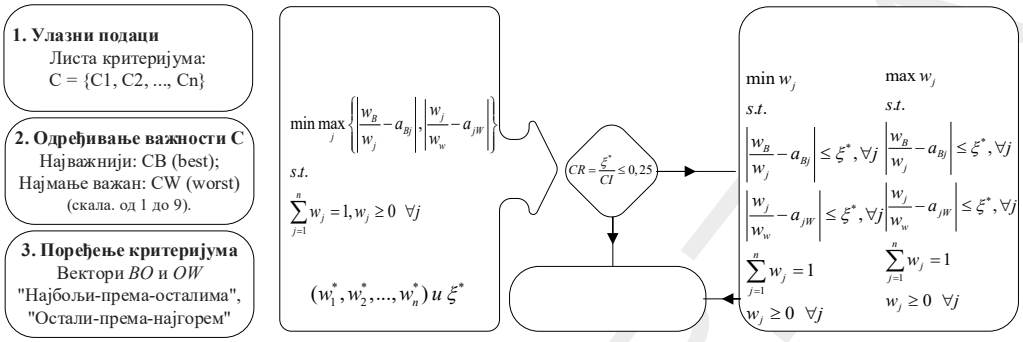
DRAFT VERZIJA

програмираног уноса нутријената, циклуса примене јела и економичности организације исхране у Војној академији.

2. ПРИМЕНА ХИБРИДНОГ BWM-R'MAIRCA МОДЕЛА

Детаљном анализом актуелне стручне и научне литературе идентификован је скуп најфреквентнијих критеријума који су кохерентни са принципима из којих исходи План исхране у Војсци Србије, а тиме и релевантни за разматрање у војним системима колективне исхране у којима је хумани (некомерцијални) мотив организовања исхране доминантан, Табела 1.

У наредним корацима је спроведена методологија BWM за прорачун тежинских коефицијената која је представљена на Слици 2.



Слика 2. Псеудо код „BWM" за прорачун тежинских коефицијената критеријума

Применом израза 4 за прорачун оптималних тежинских коефицијената добијене су следеће вредности:

$w_1 = 0.19627;$
$w_2 = 0.02453;$
$w_3 = 0.03687;$
$w_4 = 0.06155;$
$w_5 = 0.04988;$
$w_6 = 0.11567;$
$w_7 = 0.08035;$
$w_8 = 0.17174;$
$w_9 = 0.26313;$

Израчунат је степен конзистентности: $CR = \frac{\xi^*}{CI} = \frac{1,725083}{5,23} = 0.3298$

Пошто услов минималне конзистентности није задовољен ($CR > 0.25$), оптимални тежински коефицијенти критеријума израчунати су у облику интервалних вредности применом израза 5, Слика 2. Вредности интервала тежинских коефицијената, нижа граница (LB – „low boundary") и виша граница (HB – „high boundary") приказани су у Табели 1.

Табела 1: Вредности интервала тежинских коефицијената

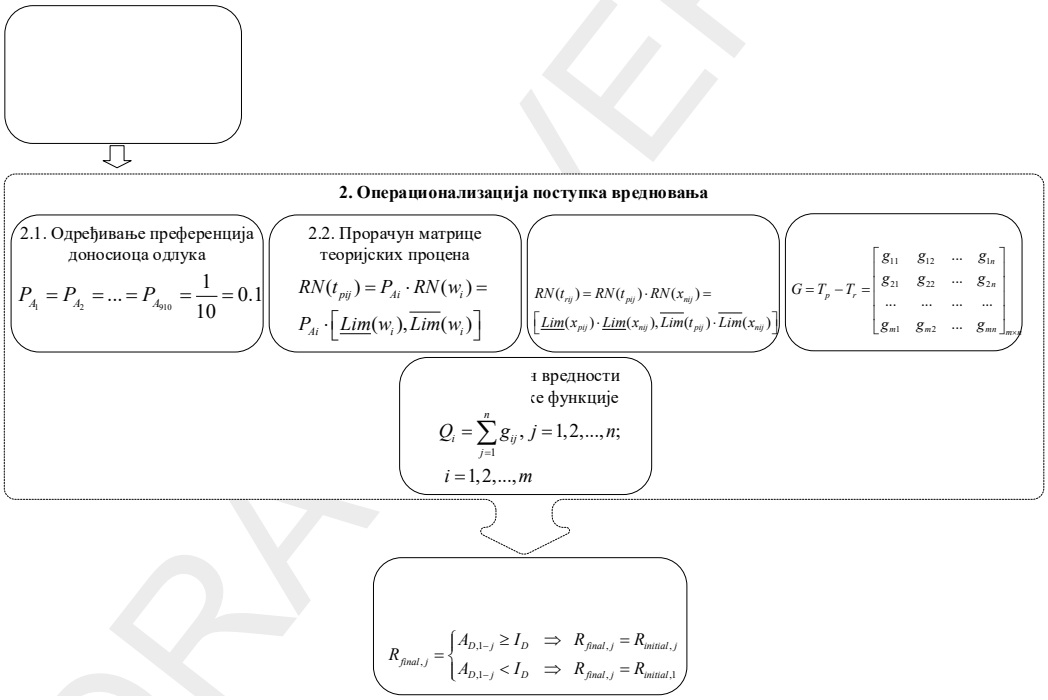
w_j	*LB*	*HB*	Ознака критеријума	Назив критеријума	Ранг
w_9	0,243181	0,302307	К-9	Индекс нутритивног квалитета	1
w_2	0,154353	0,249825	К-2	Технички захтеви припреме	2
w_8	0,128764	0,217853	К-8	Осећај након обеда	3
w_6	0,097906	0,131261	К-6	Сварљивост	4
w_7	0,074256	0,09231	К-7	Сензорна својства	5
w_4	0,051857	0,070253	К-4	Технич. техно. захтеви чувања намирница	6
w_5	0,029413	0,056111	К-5	Цена прехрамбених производа	7
w_3	0,025354	0,047368	К-3	Време припреме	8
w_1	0,022674	0,028187	К-1	Технолошки захтеви припреме	9

Вредности тежинских коефицијената критеријума који утичу на перформансе јела у оквиру организоване исхране показују да два фактора имају доминантну улогу: Индекс нутритивног квалитета (који представља објективан показатељ садржаја нутријената од значаја за опоравак, раст и развој организма) и техничка опремљеност кухињских капацитета (као предуслов за адекватну технолошку реализацију оброка). Ови критеријуми се издвајају као примарни за успешно планирање и извођење исхране у војним условима. У групу секундарних критеријума убрајају се они који се односе на корисничко искуство – сензорна својства јела, осећај након конзумирања и сварљивост, што представља субјективни одраз перцепције припремљеног оброка. Ниже на ранг листи налазе се критеријуми који се односе на услове складиштења и цену намирница, док су најниже рангирани критеријуми везани за сложеност и трајање технолошког процеса припреме. Посебно је значајна чињеница да је критеријум цене, у складу са хуманим и нефинансијским циљевима војне исхране, очекивано имао маргиналан утицај, што додатно потврђује примат квалитета исхране у односу на трошковну ефикасност.

Интеграција идентификованих критеријума за евалуацију перформанси јела побољшава процес доношења одлука, осигуравајући да јеловници испуњавају и преференције потрошача и прописане војне стандарде ради реализације мисије организације исхране у Војној академији на ефикасан и ефективан начин.

Након прорачуна тежинских коефицијената критеријума примењена је R'MAIRCA метода за вредновање и рангирање постојећих и заменских јела (алтернатива[1]) у јеловнику, Слика 3.

Добијене интервалне вредности тежинских коефицијената разматране су као интервални, односно „груби" бројеви (Rough Numbers).



Слика 3. Псеудо код „R'MAIRCA" за вредновање алтернатива

Приказ алтернатива (A1 – A10) за вредновање у R'MAIRCA моделу дат је у Табели 2. Алтернативе A1 – A7 су постојећа јела које се припремају у складу са Планом исхране, а јела A8 – A10 су заменска јела компонована супституцијом појединих компоненти оброка на основу Норми замене, ради корекције јеловника и увођења боље рангираних јела, чијом се имплементацијом у јеловник очекује побољшање Плана исхране.

[1] Избор 10 алтернатива из иницијалног скупа од 31 јела (20 најнепожељнијих постојећих и 11 заменских) извршен је DEA методом на основу података о улазима и излазима који су добијени упитником у анкети ресторанског особља (15 лица) и корисника (132 лица) (Arsić et al., 2024).

Након спроведених корака R'MAIRCA методе добијене су коначне вредности критеријумских функција (израз 2.5) у форми реалних бројева на основу којих је извршено је рангирање алтернатива $R_{initial,j}$ у конкретном моделу, Табела 2.

У наредном кораку је одређен индекс доминације прворангиране алтернативе који дефинише њену предност у односу на остале алтернативе, Табела 2. Индекс доминације одређује се применом израза

$$A_{D,1-j} = \frac{Q_j - Q_1}{Q_n},\ j = 2,3,..,m$$

где Q_1 представља критеријумску функцију алтернативе која је последња по рангу, Q_j представља критеријумску функцију алтернативе са којом се прворангирана алтернатива пореди, m представља укупан број алтерантива.

Након одређивања индекса доминације одређен је праг доминације I_D, применом израза

$$I_D = \frac{m-1}{m^2} = \frac{10-1}{10^2} = 0,09$$

Уколико је испуњен услов да је индекс доминације $A_{D,1-j}$ већи или једнак прагу доминације I_D ($A_{D,1-j} \geq I_D$), тада се задржава добијени ранг. Уколико је индекс доминације $A_{D,1-j}$ мањи од прага доминације I_D ($A_{D,1-j} < I_D$), прворангирана алтернатива нема довољну предност над посматраном алтернативом (израз 3) Слика 3. Применом претходног израза потврђен је ранг алтернатива $R_{final,j}$, Табела 2.

Табела 2. Коначни рангови алтернатива

Алт.	Назив јела	*Ri*	$A_{D,1-j}$	*Rf*
A1	Војнички пасуљ са конзервом од свињског паприкаша	6	0,267	6
A2	Чорбаст пасуљ са сувом сланином	8	0,3211	8
A3	Ловачки кромпир са месом	5	0,2597	5
A4	Пуњене паприке и пире кромпир	3	0,1596	3
A5	Свињско печење, подварак и пире кромпир	10	0,3586	10
A6	Кромпир паприкаш са јунећим месом	4	0,2416	4
A7	Јунетина у поврћу	9	0,3369	9
A8	*Пекарски кромпир са кобасицом*	7	0,3103	7
A9	*Јунећи умокац са пире кромпиром*	2	0,1558	2
A10	*Рестована јунећа џигерица и пире кромир*	1	0	1

Након спроведеног поступка рангирања алтернатива извршена је замена постојећих неконзумираних јела њиховим најближим вишерангираним заменским суседима (бољих укупних перформанси) према следећем: замена постојећег другорангираног јела „Пуњене паприке и пире кромпир" са заменским прворангираним јелом „Рестована јунећа џигерица и пире кромир", затим замене јела четвртог ранга „Ловачки кромпир са месом" са трећерангираним заменским јелом „Јунећи умокац са пире кромпиром" и постојећег јела седмог ранга „Јунетина у поврћу" са заменским јелом шестог ранга „Пекарски кромпир са кобасицом".

Заменом јела на овај начин очувани су :

- вредност просечног програмираног уноса нутријената,
- циклус примене јела на месечном и годишњем нивоу,
- економичност набавке и чувања намирница и
- технолошки процес припреме јела,

уз побољшање сензорних перформанси јела на основу очекивања корисника, чиме се обезбеђује већа искористљивост припремљених оброка, смањују губици који настају бацањем хране и унапређује се реализација јеловника у Војној академији целисходнијим коришћење постојећих ресурса.

3. ЗАКЉУЧАК

Имајући у виду чињенице да је План исхране структуриран и оптимизован реализацијом више научних пројеката Факултета организационих наука и Војне поште 1089-3 Београд, у периоду од 1983-1992. године, у другачијим околностима и деловањем тада актуелних утицајних фактора те да су, због усвајања нових мисија и задатака, напрезања припадника ВС и МО појачана а навике у исхрани због нових трендова у науци и технологији припреме хране промењене (нарочито код млађих категорија

лица), намеће се потреба за унапређењем реализације Плана исхране кроз усклађивање јеловника Војне академије са потребама корисника, ради побољшања задовољства исхраном и елиминисања трошкова који настају због бацања хране.

Истраживање је спроведено на Војној академији Универзитета одбране у ресторану за исхрану корисника са доминантном категоријом лица узраста од 18 до 27 година (кадети Војне академије и Медицинског факултета Војномедицинске академије), која је приближна узрасту војника на служењу војног рока, од 18 до 30 година, чији ће се број у Војсци Србије повећати у наредном периоду због увођења обавезе служења војног рока.

На основу евиденције обедовања и DEA анализе ефикасности, идентификован је подскуп од седам постојећих и три нова јела која су послужила као кандидати за даљу оптимизацију. Хибридни BWM–R'MAIRCA модел је затим омогућио прецизно рангирање алтернатива мерењем јаза између идеалних и емпиријских пондера, чиме је утврђено да је најцелисходнија замена кромпир-паприкаша са јунећим месом (A3) јело јунећи умокац са пире-кромпиром (A9). Та одлука је емпиријски проверена: увођење A9 донело је уштеду од 10,08 %, повећало нутритивни индекс за 1,65 поена и подигло просечну сензорну оцену на 9,6 уз стопостотну конзумацију припремљених порција. Овим је на убедљив начин доказана претпоставка да се пројектовањем вишекритеријумског модела, у постојећим условима, може повећати задовољство корисника исхраном.

Хибридни модел BWM–R'MAIRCA омогућава да се на објективан и ефикасан начин, минимизирајући субјективизам искуствене процене стручних органа Интендантске службе (ИнСл) који су задужени за израду функционалног јеловника у свим околностима, изврши замена идентификованих мање пожељних јела са оптималним заменским алтернативама (креирана на основу очекивања корисника и Норми замене Плана исхране) која ће бити искоришћена и испунити циљеве исхране.

Методологија је применљива у пракси за све објекте исхране у Војсци Србије и ван система одбране, као и у организацијама колективне исхране (образовне и здравствене институције, полоција, корпоративне кантине и други) које теже да максимирају бенефите исхране корисника на економичан начин.

ЛИТЕРАТУРА

Arsić, S. N., Pamučar, D. S., Milenkov, M. A., Sokolović, V. S., & Janošević, M. M. (2024). *A model for evaluating menu performance in collective nutrition organizations based on the DEA method*. *72*, 4. https://doi.org/10.5937/vojtehg72-52600

Nedeljko Jokić. (2004). *Kulinarstvo i zdrava ishrana* (S. Đurđević & S. Đerić-Magazinović (eds.); Vojna knji, Vol. 1). Vojnoizdavački zavod.

Pamučar, D., LJubisav, V., & Lukovac, V. (2014). *Selection of railway level crossings for investing in security equipment using hybrid DEMATEL-MARICA model: Application of a new method of multi-criteria decision-making*. 89–92. https://doi.org/DOI:10.13140/2.1.2707.6807

Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, *53*, 49–57. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009

Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega (United Kingdom)*, *64*, 126–130. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001

DRAFT VERSION

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

PRIMENA AHP METODE ZA PROCENU VEROVATNOĆE USPEHA MLADIH KANDIDATA NA VOZAČKOM ISPITU

APPLICATION OF THE AHP METHOD FOR PREDICTING DRIVING TEST SUCCESS AMONG YOUNG CANDIDATES

SRĐAN LJUBOJEVIĆ[1], JELENA VICANOVIĆ[2], ANA ZEKIĆ[3]
[1] Univerzitet odbrane, Vojna akademija, Beograd, srdjan.ljubojevic@va.mod.gov.rs, 0000-0002-2696-3062
[2] Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, jvicanovic@tmf.bg.ac.rs, 0000-0002-8268-5503
[3] Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, azekovic@tmf.bg.ac.rs, 0000-0001-9314-8984

Rezime: *Na populaciji mladih kandidata, pre obuke za vožnju, sprovedeno je testiranje korišćenjem Vienna Test System-a, standardizovanog psihološkog alata koji meri kognitivne, psihomotorne i emocionalne sposobnosti kao i ponašanje relevantno za bezbedno učešće u saobraćaju. Cilj ovog rada je da pomoću analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP) utvrdimo da li i u kojoj meri karakteristike kandidata merene pre početka obuke mogu ukazati na ishod vozačkog ispita. Ovakav pristup može biti koristan za identifikaciju kandidata kojima je potrebna dodatna podrška tokom obuke i pružiti instruktorima smernice o aspektima na koje treba posebno obratiti pažnju.*

Ključne reči: *Analitički hijerarhijski proces, višekriterijumska optimizacija, predikcija uspeha, psihološko testiranje.*

Abstract: *Before training, a group of young candidates completed a standardized psychological evaluation using a Vienna Test System - a psychological tool that measures cognitive, psychomotor, and emotional abilities, as well as behavioral traits relevant to safe participation in traffic. The aim of this study is to use the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine whether, and to what extent, candidate characteristics measured before training can indicate the outcome of the driving test. This approach may be useful for identifying candidates who require additional support during training and to guide instructors on what to pay attention to.*

Keywords: *Analytical Hierarchy Process, multi-criteria optimization, success prediction, psychological testing.*

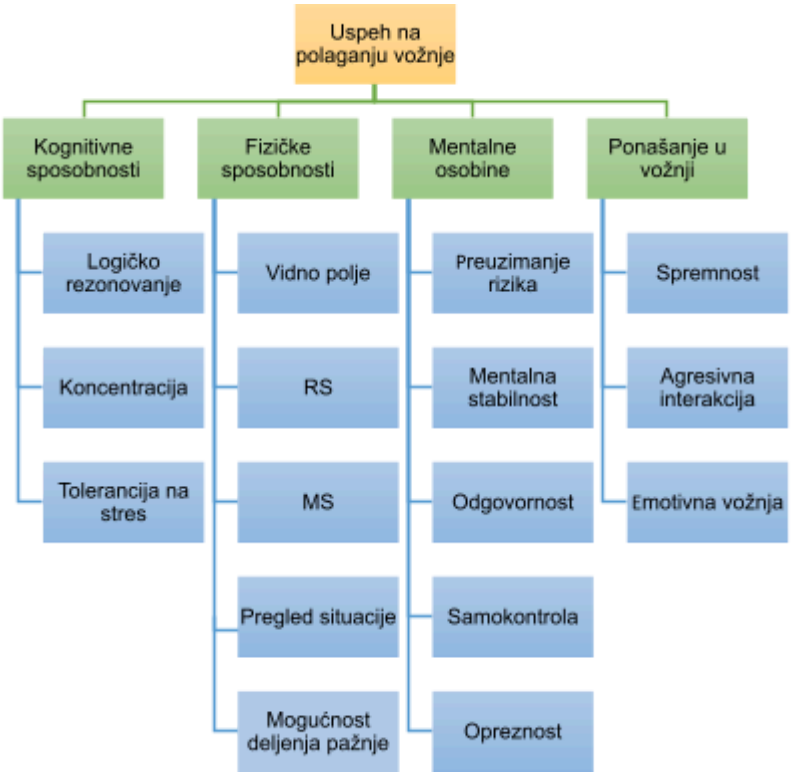
1. UVOD

Vienna Test System (VTS) je standardizovano testiranje koje se koristi u profesionalnoj psihologiji, posebno u oblastima selekcije vozača, procene pažnje, kontrole impulsa, sposobnosti donošenja odluka pod pritiskom i drugih aspekata psihofizičke spremnosti. U okviru ovog rada testiranje je sprovedeno na populaciji mladih kandidata za polaganje vozačkog ispita, i to pre početka njihove obuke. Uzorak je obuhvatio 582 kandidata od kojih je 441 uspešno položilo vozački ispit, dok ostalih 141 nije. Treba napomenuti da je 96 kandidata palo na ispitu zbog nedozvoljene (eliminacione) greške, a 45 zbog broja negativnih poena većeg od 15. Testirane su sledeće karakteristike kandidata: logičko rezonovanje (AMT), koncentracija (COG), tolerancija na stres (DT), vidno polje (VF), mogućnost deljenja pažnje (TD), prosečno vreme reakcije (RS), prosečno motoričko vreme (MS), pregled situacije (ATAVT), mentalna stabilnost (MST), odgovornost (RSB), samokontrola (SC), izbegavanje rizika (RA), preuzimanje rizika (RR), subjektivna procena sopstvene spremnosti (SP), agresivna interakcija (AI) i emotivna vožnja (ED). Sve vrednosti su numeričke, date percentilno u skali 0-100.

Ideja ovog istraživanja je da primenom Analitičke hijerarhijske metode (AHP) na rezultate dobijene testiranjem razvijemo model koji bi predviđao uspeh kandidata na vozačkom ispitu. AHP je poznat pristup višekriterijumskog odlučivanja, predstavljen 1980.godine u radu [6] (i dodatno razradjen u [3]), kod kog se kroz hijerarhijsku strukturu kriterijuma i parna poređenja, omogućava dodeljivanje težina pojedinačnim karakteristikama kandidata. Zarad veće tačnosti u određivanju težina, konsultovani su i rezultati logističke regresije, na osnovu koje je izvedeno rangiranje osobina po njihovom doprinosu ishodu. Ovaj model može doprineti ranom prepoznavanju kandidata sa potencijalnim teškoćama, kao i pomoći instruktorima da se fokusiraju na aspekte obuke koji su od najvećeg značaja. Vredno je napomenuti da se u pojedinim istraživanjima AHP metoda kombinuje sa TOPSIS metodom, što je prikazano u radovima [1,5].

2. Određivanje težina kriterijuma za AHP

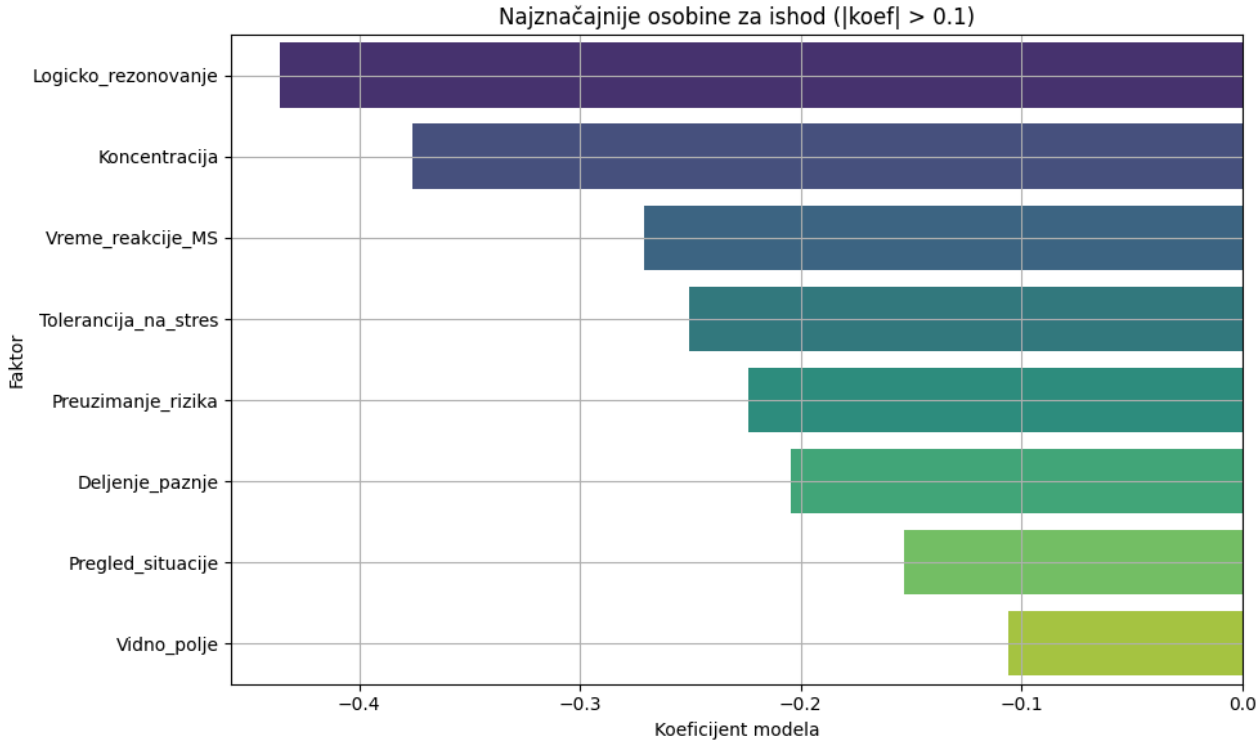
Da bismo primenili AHP metod, podelili smo osobine kandidata u četiri grane kao što je prikazano na sledećoj slici:



Slika 1: AHP struktura modela

Poredićemo grane i osobine parno pomoću AHP skale (1-9) kako bismo izračunali lokalne prioritete svake osobine unutar grane, a zatim globalne težine svake osobine prema cilju. Kako bismo imali bolju procenu koliko koja osobina utiče na ishod, na skup podataka smo primenili algoritam logističke regresije i dobili rezultat prikazan na Slici 2. U našem skupu podataka ishod '0' označava da je kandidat položio, dok ishod '1' označava da je pao. S tim u vezi, ako je rezultat logističke regresije za neku osobinu negativan, znači da što je veća vrednost tog parametra, manja je verovatnoća da će kandidat pasti, odnosno veća da će položiti. Smatramo da samo one osobine za koje logistička regresija dobije rezultat po apsolutnoj vrednosti veći od 0.1 značajnije doprinose modelu. Za više informacija o metodi logističke regresije, čitalac se upućuje na [2,4].

Na osnovu rezultata predstavljenog na Slici 2 zaključujemo da bi redosled po važnosti među granama bio: kognitivne sposobnosti, fizičke sposobnosti, mentalne osobine, ponašanje u vožnji. Iako Saaty [6] predlaže skalu poređenja u opsegu od 1 do 9, odlučili smo se za ograničenu skalu od 1 do 5 (Tabela 1), s obzirom na to da su razlike u važnosti među kriterijumima umerene. Prilikom prioritizacije osobina unutar svake grane ćemo se takođe voditi ovim redosledom (sa Slike 2), s tim što za osobine čiji je koeficijent po apsolutnoj vrednosti manji od 0.1 pretpostavljamo da su podjednako značajni.



Slika 2: Uticaj pojedinačnih faktora na ishod primenom algoritma logistička regresija

Tabela 1 : Matrica poređenja grana

	Kognitivne sposobnosti	Fizičke sposobnosti	Mentalne osobine	Ponašanje u vožnji
Kognitivne sposobnosti	1	3	4	5
Fizičke sposobnosti	1/3	1	2	3
Mentalne osobine	1/4	1/2	1	2
Ponašanje u vožnji	1/5	1/3	1/2	1

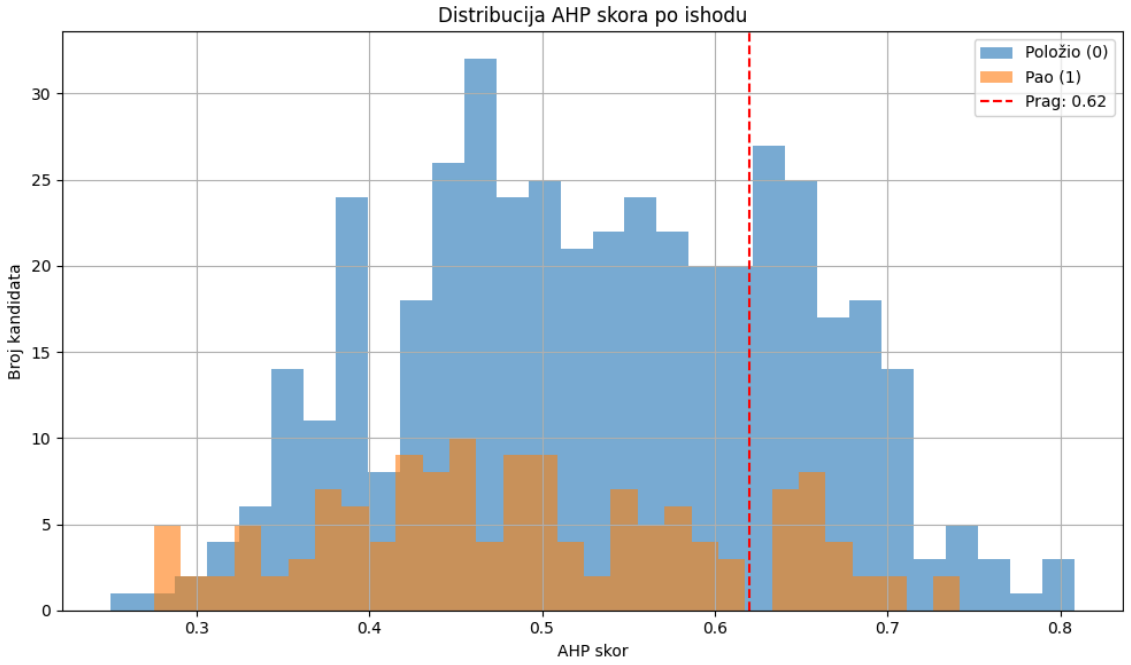
Iz tabele 1 na osnovu vektora sopstvenih vrednosti, nakon normalizacije dobijamo sledeće težine za četiri glavne grane: **Kognitivne sposobnosti** 0.542, **Fizičke sposobnosti** 0.233, **Mentalne osobine** 0.139, **Ponašanje u vožnji** 0.085. Primenjujući isti princip na osobine unutar svake grane, dobijamo njihove lokalne težine (Slika 3). Nakon što ove lokalne težine pomnožimo sa težinama grana dobijamo globalne težine za sve osobine.

Slika 3: Lokalne težine osobina

Navodimo dobijene globalne težine po važnosti: logičko rezonovanje (AMT) **0.344**, koncentracija (COG) **0.141**, prosečno motoričko vreme (MS) **0.08,** mogućnost deljenja pažnje (TD) **0.06,** tolerancija na stres (DT) **0.057**, preuzimanje rizika (RR) **0.051**, pregled situacije (ATAVT) **0.05,** vidno polje (VF) **0.033**, subjektivna procena sopstvene spremnosti (SP) **0.028**, agresivna interakcija (AI) **0.028** i emotivna vožnja (ED) **0.028,** mentalna stabilnost (MST) **0.021**, odgovornost (RSB) **0.021**, samokontrola (SC) **0.021**, izbegavanje rizika-opreznost (RA) **0.021,** prosečno vreme reakcije (RS) **0.01**.

3. Primena AHP modela

Dobijene težine ćemo množiti sa ostvarenim vrednostima kandidata kako bismo dobili njihove AHP skorove. To je kvantitativna mera koja omogućava poređenje kandidata u skladu sa značajem svake osobine. Zatim ćemo AHP skorove uporediti sa ishodima kandidata na vozačkom ispitu. Podaci do kojih smo došli prikazani su histogramom:



Histogram ukazuje na veliko preklapanje između grupa kandidata koji su položili i koji su pali. Zbog toga je teško utvrditi jasan prag koji razdvaja uspešne od neuspešnih. Odabrali smo 0.62 zbog dobre osetljivosti, 82.3% tačno identifikovanih neuspelih kandidata - model dobro prepoznaje kandidate koji će pasti. Ovo je značajno jer će instruktorima davati preporuku da obrate više pažnje na "rizične" kandidate čiji je skor manji od 0.62. Sa druge strane, vidimo da je veliki broj kandidata ispod praga položio vozački ispit, pri čemu neki imaju i veoma nizak skor. To nam sugeriše da je sama obuka (intenzitet, kvalitet instruktora, praksa) ključan faktor uspeha. Ukupna tačnost modela je nešto viša od 40%, a može se povećati pomeranjem praga u levo, ali se time osetljivost smanjuje. Daljom analizom "izuzetaka", odnosno kandidata koji su pali na ispitu uprkos visokom skoru, uvideli smo da je 80% njih palo zbog načinjene nedozvoljene greške (nepoštovanje prvenstva, znakova, ugrožavanje bezbednosti, nepostupanje po naredbama ispitne komisije itd.).

Kako bi model bio jednostavniji za primenu u praksi, dodatna analiza je pokazala da model može zadržati jednaku tačnost i kada se koristi samo 8 osobina sa najvećim AHP težinama. Sa druge strane, pokušali smo da povećamo tačnost korišćenjem drugih metoda višekriterijumske optimizacije i veštačkih neuronskih mreža, ali rezultat nije bio bolji. Ni modifikacija težina pomoću drugih algoritama mašinskog učenja (Random forest, XGBoost) nije značajnije uticala na tačnost predikcije. To potvrđuje prethodni zaključak da će obuka biti presudna za uspeh kandidata na vozačkom ispitu.

4. Zaključak i buduća istraživanja

AHP pristup se u ovom istraživanju pokazao kao koristan alat za identifikaciju kandidata koji bi potencijalno mogli imati poteškoća u savladavanju veštine vožnje. Na osnovu psihološkog profila i objektivnih performansi, moguće je izračunati kvantitativan skor koji signalizira povećan rizik od neuspeha. Značaj ovog rada ogleda se i u tome što se kombinuju višekriterijumska optimizacija i mašinsko učenje - prioritizacija osobina unutar AHP modela izvedena je na osnovu rezultata logističke regresije, a ne na osnovu subjektivne procene. Međutim, rezultati pokazuju da i kandidati sa niskim AHP skorom mogu uspešno položiti ispit, što jasno upućuje da je ulaganje u kvalitetnu obuku kandidata daleko delotvornije za podizanje uspešnosti nego primena kompleksnih prediktivnih modela.

Uprkos pokušajima da se tačnost modela poboljša primenom drugih metoda višekriterijumske optimizacije i savremenih algoritama mašinskog učenja (uključujući neuronske mreže), nije došlo do značajnog unapređenja rezultata. To dodatno potvrđuje tezu da tehnička složenost modela ne može nadomestiti ulogu direktnog rada sa kandidatom.

U uvodu je pomenuto da je više od dve trećine neuspešnih kandidata načinilo eliminacionu grešku, što ih je automatski diskvalifikovalo. Na osnovu dobijenih podataka i dodatne analize, korelacija između rezultata psiholoških testova i ovih grešaka nije pronađena, što sugeriše da one verovatno ne proističu iz stabilnih osobina kandidata, već iz trenutnog emocionalnog stanja. Zbog pretpostavke da su eliminacione greške povezane sa izraženom tremom, anksioznošću ili psihološkim pritiskom u trenutku ispita, a ne sa opštim sposobnostima kandidata, u budućim istraživanjima bi bilo korisno meriti fiziološke indikatore nivoa treme neposredno pre ispita. Verujemo da bi takav pristup doprineo ne samo većoj tačnosti modela, već i unapređenju procedure polaganja ispita. Takođe, dalja istraživanja mogu uključiti višeciljne optimizacione pristupe kao što se može videti u radovima poput [7].

ZAHVALNICA

Ovaj rad je proistekao iz naučnoistraživačkih projekata VA-TT/2/20-25 koji finansira Ministarstvo odbrane Republike Srbije i 51-03-136/2025-03/20013 koji finansira Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije.

LITERATURA

Benallou, I., Azmani, A. & Azmani, M. (2023). A combined AHP-TOPSIS model for the evaluation andselection of truck drivers. Journal of theoretical and applied information technology, 101(7) (pp.2837-2847).

Brownlee, J. (2020). Logistic regression tutorial for machine learning. Machine Learning Mastery.https:// machinelearningmastery.com/logistic-regression-tutorial-for-machine-learning/ (Pristupljeno: 20. maj2025)

Cabała, P. (2010). Using the analytic hierarchy process in evaluating decision alternatives. Operationsresearch and decisions, 20(1), 5-23.

Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). Applied logistic regression. John Wiley &Sons.

Pohan, A. B., Hadi, S. W., Rahmatullah, S., Zuama, R. A., Rifai, A., & Gunawan, D. (2021). Employeeperformance apparaisal using decision support system by ahp and topsis methods. Jurnal Khatulistiwa Informatika, 7(1), 100-105.

Saaty, T.L. (1980). The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill .heng, Y., & Wang, D. X. (2022). A survey of recommender systems with multi-objective optimization.Neurocomputing, 474, 141-153.

SYM-OP-IS 2025
52. Simpozijum o operacionim istraživanjima
Palić, 7 - 10.9.2025.

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ORGANIZACIONIH NAUKA

Originalni članak

PROCENA USPEŠNOSTI KANDIDATA NA POLAGANJU VOZAČKOG ISPITA POMOĆU TOPSIS METODE I NJENIH MODIFIKACIJA

ASSESSMENT OF CANDIDATES PERFORMANCE IN THE DRIVING TEST USING THE TOPSIS METHOD AND ITS MODIFICATIONS

JASMINA VUJADINOVIĆ[1], IVANA SARIĆ[2], RALE NIKOLIĆ[3]

[1] Univerzitet odbrane, Vojna akademija, Beograd, jasmina.fijuljanin@va.mod.gov.rs, 0000-0003-2479-9868
[2] Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, isaric@tmf.bg.ac.rs, 0000-0001-9141-8098
[3] Univerzitet odbrane, Vojna akademija, Beograd, rale.nikolic@va.mod.gov.rs, 0000-0002-8703-3029

Rezime: *Cilj ovog rada je procena uspešnosti kandidata na polaganju vozačkog ispita primenom višekriterijumskih metoda odlučivanja, sa posebnim fokusom na TOPSIS metodu i njene modifikacije. Kandidati su prethodno testirani korišćenjem* Viena Test System-a*, standardizovanog psihološkog alata za procenu relevantnih sposobnosti za upravljanje vozilom. U radu je primenjena osnovna TOPSIS metoda, kao i njene varijacije koje se razlikuju po načinu određivanja težina za kriterijume dobijene iz rezultata testa. Pored klasičnih pristupa za određivanje težina (logistička regresija, nasumično generisanje težina), razvijena je i modifikacija koja koristi* genetski algoritam *u cilju optimizacije težinskih koeficijenata na osnovu uspešnosti kandidata na praktičnom delu ispita. Predloženi pristup može doprineti unapređenju procesa selekcije i obuke vozača kroz objektivniju procenu psihomotoričkih sposobnosti.*

Ključne reči: *TOPSIS, višekriterijumsko odlučivanje, Vienna Test System, vozački ispit, genetski algoritam.*

Abstract: *The aim of this paper is to assess candidates success in passing the driving test using multi-criteria decision-making methods, with a particular focus on the TOPSIS method and its modifications. The candidates were evaluated using the Vienna Test System, a standardized psychological tool for assessing abilities relevant to driving. The basic TOPSIS method was applied, along with several variations differing in the approach to determining criteria weights derived from the test results. In addition to conventional weighting methods (logistic regression, random generation of weights), a modified approach was developed using a genetic algorithm to optimize the weight coefficients based on candidates performance in the practical part of the driving test. The proposed approach can contribute to enhancing the driver selection and training process through a more objective evaluation of psychomotor abilities.*

Keywords: *TOPSIS, multi-criteria decision-making, Vienna Test System, driving test, genetic algorithm.*

1. UVOD

Bezbednost u saobraćaju i smanjenje broja saobraćajnih nezgoda je jedan od imperativa modernog društva. Oba u velikoj meri zavise od sposobnosti i spremnosti vozača. Pored teorijskih znanja i praktične obuke, procena psiholoških, motoričkih i kognitivnih sposobnosti kandidata predstavlja važan korak u procesu selekcije vozača. Jedan od najčešće korišćenih i, veruje se veoma pouzdanih, alata za ovu svrhu je *Vienna Test System* (VTS).

VTS je standardizovana platforma za psihološko testiranje, koja omogućava procenu širokog spektra sposobnosti značajnih za vozače. VTS testovi uključuju merenje pažnje, brzine reakcije, sposobnosti procene rastojanja, reakciju na stres i drugih faktora koji direktno utiču na sposobost vozača da bezbedno upravljanje vozilom.

Na osnovu rezultata testiranja, neophodno je doneti odluku upravo o sposobnosti kandidata, što podrazumeva evaluaciju na osnovu više izvršenih testova, tj. kriterijuma. U takvim situacijama primenjuju se višekriterijumske metode odlučivanja (MCDM) (Hwang, 1981), među kojima se izdvaja TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) metoda. TOPSIS metoda (Taherdoost, 2024)

DRAFT VERZIJA

omogućava rangiranje kandidata prema udaljenosti od idealnog rešenja (najpovoljnijih rezultata po svim kriterijumima) i anti-idealnog rešenja (najnepovoljnijih rezultata). Osnovni koraci ove metode uključuju normalizaciju matrice podataka, primenu težinskih koeficijenata za kriterijume, određivanje pozitivnog i negativnog idealnog rešenja, izračunavanje udaljenosti od ovih tačaka i konačno, rangiranje kandidata na osnovu relativne bliskosti idealnom rešenju (García-Cascales, 2010).

Jedan od ključnih izazova u primeni TOPSIS (Pohan, 2021) metode leži u određivanju težina za pojedinačne kriterijume, budući da one značajno utiču na krajnji rezultat. U literaturi se koriste različiti pristupi za određivanje težina, kao što su Entropijska metoda, Analitički hijerarhijski proces (AHP) i subjektivne procene eksperata. U cilju unapređenja ovog postupka, u radu su primenjene modifikacije TOPSIS metode koje uključuju optimizaciju težina korišćenjem genetskog algoritma. Na ovaj način omogućava se adaptivno određivanje težina na osnovu stvarnih rezultata kandidata na praktičnom delu vozačkog ispita, čime se poboljšava tačnost i objektivnost procene.

Ovaj rad ima za cilj da uporedi uspešnost kandidata dobijenu klasičnom i modifikacijama TOPSIS metode, u kojima se težine određuju različitim pristupima. Ove modifikacije uključuju i optimizaciju pomoću genetskog algoritma. Poseban akcenat stavljen je na utvrđivanje doprinosa primena adaptivnih težinskih koeficijenata boljoj selekciji kandidata, sa većim potencijalom za uspešno polaganje vozačkog ispita. Prirodno se postavlja pitanje postoji li povezanost VTS testiranja i uspeha kandidata na vozačkom ispitu?

2. VIENA TEST SYSTEM I MODIFIKACIJE TOPSIS METODE

VTS je sistem za psihološko testiranje koji se koristi za procenu različitih kognitivnih, psihomotoričkih, emocionalnih i drugih psiholoških sposobnosti. Razvio ga je *Schuhfried GmbH* u Beču (Schuhfried, 2013), a koristi se širom sveta u različitim oblastima kao što su klinička psihologija, psihologija rada (selekcija kadrova, procena sposobnosti vozača, pilota), sportska psihologija, itd (Kubinger, 2007).

U ovom radu kandidati su testirani VTS-om koji sadrži različite testove za procenu vozačke sposobnosti. U sledećoj tabeli je data klasifikacija kriterijuma.

Tabela 1: Kasifikacija kriterijuma u VTS-u

Kriterijum		Funkcija kriterijuma	Opis
COG		Kognitivna sposobnost	Prepoznavanje vizuelnih šablona.
DT		Psihomotorna + pažnja	Brzina reagovanja na različite stimulanse.
PP-R	**VF**	Vizuelna percepcija	Percepcija objekata u perifernom vidnom polju.
	TD	Psihomotorna kontrola	Preciznost održavanja položaja i praćenja.
RT	**RS**	Psihomotorna sposobnost	Vreme reakcije na stimulus.
	MS	Psihomotorna sposobnost	Brzina motoričkog odgovora.
ATAVT		Vizuelna percepcija	Prepoznavanje saobraćajnih scena u kratkom vremenu.
IVPE	**MST**	Psihomotorna brzina	Brzina izvršavanja motoričkih zadataka.
	RSB	Psihomotorna brzina	Vreme reakcije pritiskom na taster.
	SC	Pažnja i koncentracija	Održavanje pažnje i selektivno reagovanje.
	RA	Kognitivno-psihološka procena	Sklonost ka preuzimanju rizika.
RR		Pažnja / verbalna fluentnost	Verbalna fluentnost i pažnja.
VIP	**SP**	Kognitivna sposobnost	Prostorna percepcija i orijentacija.
	AI	Kognitivna sposobnost	Rešavanje logičkih i apstraktnih zadataka.
	ED	Emocionalna i psihološka procena	Odluke u emocionalno izazovnim situacijama.

U cilju procene uspešnosti kandidata na vozačkom ispitu, primenjene su četiri varijante TOPSIS metode koje se razlikuju po načinu određivanja težinskih koeficijenata za kriterijume dobijene iz VTS-a: Classic TOPSIS, LogReg varijanta, Random varijanta i GA varijanta.

Kod Classic TOPSIS metode višekriterijumskog odlučivanja nakon normalizacije matrice podataka prilikom narednog koraka dodeljivanja težina kriterijumima, u klasičnoj varijanti sve težine su jednake (0,0625), tj. svi kriterijumi su podjednako važni.

U LogReg varijanti težine su dodeljene kriterijumima na osnovu logističke regresije. Logistička regresija je statistički model koji se koristi za predviđanje verovatnoće da neki događaj pripada jednoj od dve moguće

DRAFT VERZIJA

klase položio i nije položio. Logistička regresija se primenjuje jer je jednostavna za implementaciju, brza za treniranje i daje jasnu interpretaciju rezultata.

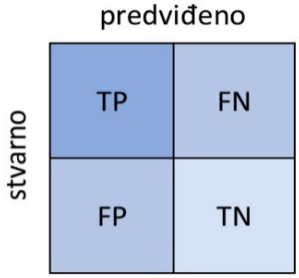
U trećoj, Random varijanti se svakom kriterijumu dodeljuje nasumično izabrana težina iz intervala *(0,1)* bez uvida u podatke ili relevantnost kriterijuma. Prilikom nasumične dodele vrednosti nema statističkog određivanja težina, nema analize značaja kriterijuma. Svaka težina se generiše nasumično, tako da njihov zbir bude 1. Ovaj postupak se ponavlja *iter* broj puta, gde je *iter* broj iteracija, do zadovoljenja kriterijuma zaustavljanja.

U četvrtoj GA varijanti težine se optimizuju pomoću genetskog algoritma. Genetski algoritam (Holland, 1975) je metaheuristički optimizacioni algoritam inspirisan principima prirodne selekcije i evolucije**.** Koristi se za rešavanje složenih problema kod kojih pronalaženje optimalnog rešenja nije moguće klasičnim metodama (Alam, 2020) (Vie, 2020). Na početku se vrši inicijalizacija populacije, tj. nasumično se generiše skup potencijalnih rešenja (tzv. jedinke ili hromozomi). Zatim se svako rešenje ocenjuje prema tome koliko je „dobro" za problem. Ovaj korak se naziva procena, tj. određivanje *fitness* funkcije. Nakon toga se određuju ključni operatori genetskog algoritma: selekcija (*selection*), ukrštanje (*crossover*) i mutacija (*mutation*). Selekcija je proces u kojem biramo najbolja rešenja iz trenutne populacije (roditelji) da bi se koristila za pravljenje nove generacije. Ideja je da rešenja sa boljom *fitness* funkcijom imaju veću šansu da budu roditelji**.** Ukštanje je proces u kojem se dva roditeljska rešenja kombinuju da bi stvorilo novo rešenje. To je ključni mehanizam za prenošenje osobina iz prethodnih rešenja i kombinovanje dobrih karakteristika. Uloga mutacije je da održi raznovrsnost populacije i da spreči algoritam da se „zaglavi" u lokalnom optimumu. Kroz sve ove korake stara populacija se delimično ili u potpunosti zamenjuje novom i proces se ponavlja dok se ne dostigne zadati broj generacija ili zadovoljavajuće rešenje. Prednosti genetskog algoritma su: može da optimizuje i vrlo složene, nelinearne i višedimenzionalne probleme; ne zahteva da problem bude diferencijabilan ili neprekidan; prilagodljiv za različite vrste kriterijuma i ograničenja.

Za evaluaciju uspešnosti primenjenih varijanti TOPSIS metode iz matrice konfuzije izračunate su četiri osnovne metrike: tačnost (*accuracy*), preciznost (*precision*), odziv (*recall*) i F1-*score*. Svaka od ovih metrika meri drugačiji aspekt performansi klasifikacionog modela. Rezultati mogu varirati u zavisnosti od posmatrane klase.

Matrica konfuzije je tabelarni prikaz performansi nekog klasifikacionog modela. Ona prikazuje kako su stvarne klase i predviđene klase međusobno povezane, i na taj način omogućava da se vidi ne samo tačnost modela, već i gde tačno greši.

Matrica konfuzije za procenu uspešnosti na vozačkom ispitu je prikazana na sledećoj slici:



Slika 1: Matrica konfuzije

Značenje oznaka na prethodnoj slici:

- **TP (True Positive)** - broj kandidata koji su stvarno položili i model je tačno predvideo da su položili.
- **TN (True Negative)** - broj kandidata koji stvarno nisu položili i model je tačno predvideo da nisu položili.
- **FP (False Positive)** - broj kandidata koji stvarno nisu položili, ali je model pogrešno predvideo da su položili.
- **FN (False Negative)** - broj kandidata koji su stvarno položili, ali je model pogrešno predvideo da nisu položili.

Za procenu kvaliteta različitih varijanti TOPSIS metode korišćena je *k-fold cross*-validacija. Ovo je standardna tehnika za evaluaciju modela u kontekstu ograničenog skupa podataka. Ideja *k-fold* validacije je da se ceo skup podataka podeli na *k* približno jednakih delova (*fold*-ova). U svakoj iteraciji, jedan *fold* se koristi kao test skup, dok se preostalih *k-1 fold*-ova koristi za treniranje i određivanje težina u okviru izabrane TOPSIS varijante. Ovaj postupak se ponavlja *k* puta, pri čemu svaki *fold* jednom bude test skup, a na kraju se izračunavaju prosečne vrednosti evaluacionih metrika.

DRAFT VERSION

Tačnost (*accuracy*) predstavlja procenat ukupno tačno klasifikovanih primera (i onih koji su položili i onih koji nisu položili) u odnosu na ukupan broj kandidata. Ova metrika je korisna kada su klase uravnoteženo zastupljene, ali može biti obmanjujuća kod loše balansiranih. Formula kojom se računa tačnost ne menja se u zavisnosti od klase.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{1}$$

Preciznost (*precision*) meri koliko je tačnih predikcija među onima za koje je model rekao da neće položiti. Visoka preciznost znači da model retko pogrešno označi kandidata koji je zapravo položio kao onog koji neće položiti, i obrnuto. Formula (2) koristi se za računanje preciznosti kod klase nije položio, a formulom (3) računa se preciznost za klasu položio.

$$Precision_{NP} = \frac{TN}{TN + FN} \tag{2}$$

$$Precision_{P} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{3}$$

Odziv (*recall*) meri koliko model uspešno prepoznaje sve kandidate koji stvarno nisu položili. Visok odziv znači da je model dobar u pronalaženju neuspešnih/uspešnih kandidata, i korisna je metrika u slučajevima kada je važno ne propustiti kritične slučajeve. Formula (4) koristi se za računanje odziva kod klase nije položio, a formulom (5) računa se odziv za klasu položio.

$$Recall_{NP} = \frac{TN}{TN + FP} \tag{4}$$

$$Recall_{P} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{5}$$

F1-*score* predstavlja harmonijsku sredinu između preciznosti i osetljivosti. Koristi se kada želimo ravnotežu između ove dve metrike. Viši F1-*score* ukazuje na bolji balans modela u razlikovanju uspešnih i neuspešnih kandidata. Formula kojom se računa F1-*score* ne menja se u zavisnosti od klase.

$$F1 - score = \frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall} \tag{6}$$

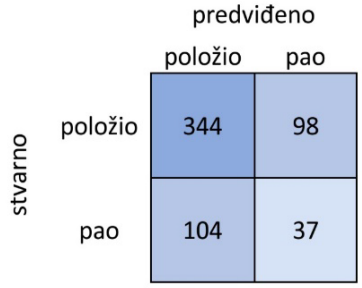
3. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

U ovom radu su korišćena testiranja izvršena VTS-om. Testirano je 583 kandidata pre obuke i polaganja vozačkog ispita. Podaci sadrže vrednosti za 16 VTS testova (kriterijuma), kao i binarnu kolonu koja predstavlja uspeh kandidata na vozačkom ispitu (0 ako je kandidat uspešno položio vozački ispit ili 1 ako nije). Na rezultate testiranja primenjene su četiri varijante TOPSIS metode, koje su opisane u prethodnom poglavlju i koje se razlikuju po načinu određivanja težinskih koeficijenata za kriterijume. Svaka metoda je evaluirana pomoću 5-*fold cross*-validacije.

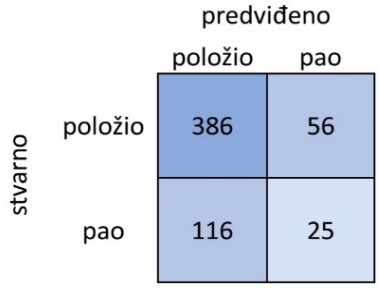
U svakom fold-u, težinski koeficijenti se određuju na osnovu trening skupa, a zatim se svi kandidati (trening i test) rangiraju u skladu sa izabranom TOPSIS varijantom. U okviru primene TOPSIS metode, rangiranjem kandidata se dobijaju kontinualni skorovi koji ne predstavljaju direktne klasifikacije. ROC (*Receiver Operating Characteristic*) analiza se koristi da bi se ispitala sposobnost ovih skorova da razlikuju uspešne od neuspešnih kandidata. Na osnovu dobijenih TOPSIS skorova za test kandidate i ROC analize određuje se optimalni prag za klasifikaciju uz pomoć koga se dobija predikcija uspešnosti kanditada na vozačkom ispitu. Kandidati čiji skor premašuje prag klasifikuju se kao uspešni (0), a ostali kao neuspešni (1). Poređenjem ovih predikcija sa stvarnim ishodima formira se matrica konfuzije, iz koje se izdvajaju ključne gore pomenute metrike. Konačni rezultati predstavljaju prosečne vrednosti metrika i težinskih koeficijenata dobijenih u svim *fold*-ovima. Ovakav pristup omogućava objektivnu procenu performansi svake TOPSIS varijante u klasifikaciji uspeha kandidata na vozačkom ispitu.

DRAFT VERZIJA

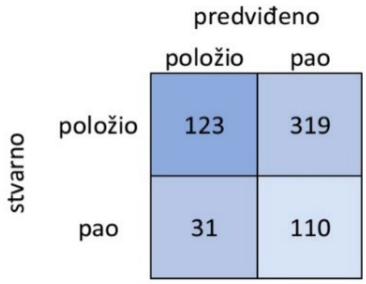
Na **Slikama 2-5** prikazane su matrice konfuzije za sve četiri varijante TOPSIS metode.



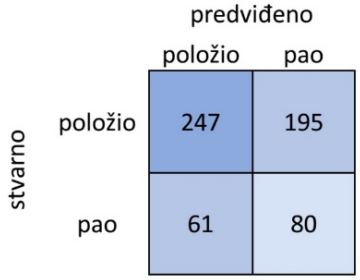
Slika 2: Matrica konfuzije za Classic TOPSIS



Slika 3: Matrica konfuzije za LogReg varijanta



Slika 4: Matrica konfuzije za Random varijantu



Slika 5: Matrica konfuzije za GA varijantu

Za klasu nije položio najbolje rezultate daje GA varijanta sa najboljim odnosom između metrika, dok za klasu položio najbolje rezultate daje LogReg varijanta kod koje su sve metrike na visokom nivou. Za obe klase najlošiji rezultati dobijaju se primenom Random varijatne.

U **Tabelama 2** i **3** (nakon zaključka) su rezultati izračunatih metrika za sve četiri varijante TOPSIS metode sa diskusijom rezultata.

Rezultati potvrđuju da izbor i optimizacija težinskih koeficijenata imaju presudan uticaj na performanse TOPSIS metode u ovakvim aplikacijama. Posebno se ističe prednost korišćenja genetskog algoritma za prilagođavanje težina prema stvarnim ishodima kandidata.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je primena TOPSIS metode i njenih modifikacija u svrhu procene uspešnosti kandidata na polaganju vozačkog ispita, na osnovu rezultata dobijenih korišćenjem *Vienna Test System*-a. Pored osnovne varijante, u kojoj su svim kriterijumima dodeljene jednake težine, razvijene su tri modifikacije metode koje se razlikuju u načinu određivanja težinskih koeficijenata - primenom logističke regresije, slučajnom dodelom i optimizacijom putem genetskog algoritma.

Analizom ostvarenih rezultata pokazano je da izbor težinskih koeficijenata značajno utiče na performanse metode, pri čemu se modifikacija sa optimizacijom težina pomoću genetskog algoritma izdvojila kao najefikasnija. Ova varijanta je ostvarila najbolji balans između tačnosti, preciznosti, odziva i F1-*score*-a bez pristrasnosti prema klasama, čime je potvrđena prednost primene optimizacionih tehnika u višekriterijumskom odlučivanju.

Dalja istraživanja mogu biti usmerena ka primeni drugih metoda za određivanje težina kriterijuma, uključujući tehnike zasnovane na veštačkoj inteligenciji i dubokom učenju, kao i testiranju predloženog pristupa na većim i raznovrsnijim skupovima podataka, u cilju dodatnog unapređenja tačnosti i pouzdanosti modela za procenu kandidata u oblasti saobraćaja i bezbednosti.

PREVIEW

Tabela 2: Analiza rezultata za klasu nije položio

TOPSIS varijanta	Accuracy	Precision	Recall	F1-*score*	Diskusija
Classic	0,654	0,413	0,264	0,170	Dobra tačnost, ali loš odziv; ne prepoznaje dovoljno neuspešnih kandidata
LogReg	0,705	0,201	0,179	0,183	Najviša tačnost, ali niska preciznost i odziv, što znači da je model pristrasan ka jednoj klasi
Random	0,400	0,258	0,782	0,383	Najveći odziv, prepoznaje skoro sve neuspešne, ali ima mnogo lažno negativnih
GA	0,561	0,352	0,567	0,357	Najbolji balans između tačnosti i odziva

Tabela 3: Analiza rezultata za klasu položio

TOPSIS varijanta	Accuracy	Precision	Recall	F1-*score*	Diskusija
Classic	0,654	0,768	0,778	0,773	Dobar odziv i preciznost, uspešno detektuje kandidate koji su položili
LogReg	0,705	0,769	0,873	0,818	Najviša ukupna tačnost, odličan odziv i F1-*score*
Random	0,400	0,799	0,278	0,412	Veoma loša tačnost i nizak odziv, model slabo prepoznaje kandidate koji su položili
GA	0,561	0,802	0,559	0,658	Dobar balans, solidno detektuje kandidate koji su položili, uz umeren broj grešaka

ZAHVALNICA

Ovaj rad je proistekao iz naučnoistraživačkog projekta VA-TT/2/20-25 koji finansira Ministarstvo odbrane Republike Srbije za sva tri autora i naučnoistraživačkog projekta 51-03-136/2025-03/20013 koji finansira Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za drugog autora.

LITERATURA

Alam, T., Qamar, S., Dixit, A., & Benaida, M. (2020). Genetic algorithm: reviews, implementations, and applications. *International Journal of Engineering Pedagogy.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.12673

García-Cascales, M. S., Lamata, M. T., & Verdegay, J. L. (2010). The TOPSIS method and its application to linguistic variables. *Preferences and Decisions. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 257,* 383-395. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15976-3_24

Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *University of Michigan Press,* (pp. 183). Ann Arbor.

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making. *Methods and Applications, 186,* 259. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

Kubinger, K. D. (2007). Psychological test calibration using the Rasch model: some critical remarks. *Psychology Science*, *49*(1), 49–56. https://doi.org/10.4018/s15327574ijt0504_3

Pohan, A. B., Hadi, S. W., Rahmatullah, S., Zuama, R. A., Rifai, A., Gunawan, D. (2021). Employee performance apparaisal using decision support system by AHP and TOPSIS methods. *Jurnal Teknik Komputer, 7*(1), 100-105. https://doi.org/10.31294/JTK.V4I2

Schuhfried, G. (2013). Vienna test system: test manual. *Mödling, Austria: Schuhfried GmbH*.

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2024). A comprehensive survey and literature review on TOPSIS. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology (IJSSMET)*, *15*(1), 1–65. https://doi.org/10.1207/IJSSMET347947

Vie, A., Kleinnijenhuis, A. M., & Farmer, D. J. (2020). Qualities, challenges and future of genetic algorithms: a literature review. https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.05277

PRAVOVERA