

UNIVERZITET U BEOGRADU
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

ČETRDESET PRVI SIMPOZIJUM
O NOVIM TEHNOLOGIJAMA U
POŠTANSKOM I TELEKOMUNIKACIONOM
SAOBRAĆAJU

PosTel 2023

THE FORTY-FIRST SYMPOSIUM
ON NOVEL TECHNOLOGIES IN
POSTAL AND TELECOMMUNICATION
TRAFFIC

28. i 29. novembar 2023.

BEOGRAD

**UNIVERZITET U BEOGRADU - SAOBRAĆAJNI FAKULTET
ODSEK ZA POŠTANSKI I TELEKOMUNIKACIONI SAOBRAĆAJ**

**ČETRDESET PRVI SIMPOZIJUM
O NOVIM TEHNOLOGIJAMA U
POŠTANSKOM I TELEKOMUNIKACIONOM
SAOBRAĆAJU**

ZBORNİK RADOVA

PosTel 2023

EDITORI:

**Prof. dr Valentina Radojičić
Prof. dr Nebojša Bojović
Prof. dr Dejan Marković
Prof. dr Goran Marković**

**BEOGRAD
28. novembar i 29. novembar 2023. godine**

**PosTel 2023 – XLI Simpozijum o novim tehnologijama
u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju
– zbornik radova –**

Editori:	Prof. dr Valentina Radojičić Prof. dr Nebojša Bojović Prof. dr Dejan Marković Prof. dr Goran Marković
Za izdavača:	dekan, Prof. dr Nebojša Bojović
Glavni i odgovorni urednik:	Prof. dr Marijana Petrović
Priprema:	Prof. dr Momčilo Dobrodolac
Izdavač:	Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, Telefon: 3976-017, Fax: 3096-704, http://www.sf.bg.ac.rs
Štampa:	“PEKOGRAF” d.o.o. Vojni put 258/D, Zemun, Beograd
Tiraž:	300 primeraka
Godina publikovanja:	2023.
DOI:	https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.PS
Web stranica Simpozijuma:	postel.sf.bg.ac.rs
Kontakt e-mail:	postel@sf.bg.ac.rs
ISBN 978-86-7395-475-2	

Izdavač zadržava sva prava.
Reprodukcija pojedinih delova ili celine ove publikacije nije dozvoljena.

ORGANIZATOR

UNIVERZITET U BEOGRADU – SAOBRAĆAJNI FAKULTET
ODSEK ZA POŠTANSKI I
TELEKOMUNIKACIONI SAOBRAĆAJ

SUORGANIZATORI

JAVNO PREDUZEĆE "POŠTA SRBIJE"

"TELEKOM SRBIJA" A.D.

REGULATORNO TELO ZA ELEKTRONSKE
KOMUNIKACIJE I POŠTANSKE USLUGE – RATEL

POKROVITELJI

MINISTARSTVO NAUKE, TEHNOLOŠKOG RAZVOJA I
INOVACIJA REPUBLIKE SRBIJE

MINISTARSTVO INFORMISANJA I TELEKOMUNIKACIJA
REPUBLIKE SRBIJE

DONATORI I SPONZORI

A1 SRBIJA D.O.O.

HUAWEI TECHNOLOGIES D.O.O.

TCOM D.O.O.

SAOBRAĆAJNI INSTITUT CIP D.O.O.

KBV DATACOM D.O.O.

ROAMING NETWORKS D.O.O.

IRITEL A.D.

ASSECO SEE D.O.O.

CRONY D.O.O.

DEX D.O.O.

PTC - PUBLIC TRANSPORT CONSULT D.O.O.

POČASNI ODBOR

Dobrivoje Jovanović
Zoran Bojković
Milan Bukumirović
Nataša Gospić
Vujadin Vešović

PROGRAMSKI ODBOR

Radojičić Valentina, predsednik Odbora
Bakmaz Miodrag, Saobraćajni fakultet
Bakmaz Bojan, Saobraćajni fakultet
Blagojević Mladenka, Saobraćajni fakultet
Bojović Nebojša, Saobraćajni fakultet
Dimitrijević Branka, Saobraćajni fakultet
Dobrodolac Momčilo, Saobraćajni fakultet
Đogatović Marko, Saobraćajni fakultet
Jevtić Nenad, Saobraćajni fakultet
Jovanović Mihailo, Ministarstvo
informisanja i telekomunikacija Republike Srbije
Knežević Nikola, Saobraćajni fakultet
Kostić-Ljubisavljević Aleksandra, Saobraćajni f.
Malnar Marija, Saobraćajni fakultet
Marković Dejan, Saobraćajni fakultet
Marković Goran, Saobraćajni fakultet
Ostojić Ljubomir, RATEL
Ožegović Spasenija, JP Pošta Srbije
Pejović Dragan, RATEL
Popović Đorđe, Saobraćajni fakultet Doboj
Radonjić Đogatović Vesna, Saobraćajni fakultet
Samčović Andreja, Saobraćajni fakultet
Simić Vladimir, Saobraćajni fakultet
Stanivuković Bojan, Saobraćajni fakultet
Stojanović Mirjana, Saobraćajni fakultet
Šarac Dragana, FTN Novi Sad
Trubint Nikola, RATEL

ORGANIZACIONI ODBOR

Marković Dejan, predsednik Odbora
Blagojević Mladenka, Saobraćajni fakultet
Bugarčić Pavle, Saobraćajni fakultet
Čupić Aleksandar, Saobraćajni fakultet
Dobrodolac Momčilo, Saobraćajni fakultet
Đumić Slavko, JKP Infostan tehnologije
Jovanović Bojan, FTN Novi Sad
Matijašević Nikola, Saobraćajni fakultet
Mikavica Branka, Saobraćajni fakultet
Mitrović Slobodan, Saobraćajni fakultet

P R E D G O V O R

Zbornik radova XLI Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2023, sadrži rezultate istraživanja iz oblasti poštanskog i telekomunikacionog saobraćaja u proteklom jednogodišnjem periodu.

Organizator Simpozijuma je Odsek za poštanski i telekomunikacioni saobraćaj Saobraćajnog fakulteta u Beogradu. Suorganizatori su: JP "Pošta Srbije", "Telekom Srbija" a.d. i Regulatorno telo za elektronske komunikacije i poštanske usluge – RATEL. Pokrovitelji su: Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije i Ministarstvo informisanja i telekomunikacija Republike Srbije.

Tematika Simpozijuma vezana je za aktuelna istraživanja u oblastima od posebnog značaja za poštanski i telekomunikacioni saobraćaj, kod nas i u okruženju. Radovi su po pozivu i svrstani su u tri sekcije:

- *Menadžment procesa u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju,*
- *Poštanski saobraćaj, mreže i servisi,*
- *Telekomunikacioni saobraćaj, mreže i servisi.*

*Autori sekcije **Menadžment procesa u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju** istraživali su aktuelne teme poštanskog i telekomunikacionog sektora, i mogućnosti primene savremenih menadžerskih alata i tehnika za rešavanje problema u ovim sektorima. Fokus autora bio je na analizi daljeg razvoja poštanskog i telekomunikacionog sektora, odnosno trendova koji ga karakterišu, sa posebnim naglaskom na doprinos poštanskog sektora smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu, pre svega kroz pronalaženje inovativnih rešenja u tehnološkim procesima prerade i dostave poštanskih pošiljaka, a sve sa ciljem prilagođavanja novonastalim uslovima poslovanja.*

*Sekcija **Poštanski saobraćaj, mreže i servisi** sadrži radove koji sa naučnog i stručnog aspekta analiziraju poštanski sektor i pripadajuće aktuelnosti. Autori radova, između ostalog, istražuju modele za unapređenje konkurencije na tržištu poštanskih usluga, mogućnosti za poboljšanje poslovanja u kontekstu savremene industrije i sa stanovišta nastupa velikih operatora u digitalnom okruženju. Takođe, pažnja je posvećena i doprinosu poštanskog sektora sprovođenju ciljeva održivog razvoja Ujedinjenih nacija, posebno u segmentu organizacije dostave u zavisnosti od tipa naselja.. Pojedini autori bave se uvek*

aktuelnim pitanjem održivosti poštanskog saobraćaja u tehnološkom smislu, tj. analizom performansi CEP operatora. Deo radova odnosi se na razmatranje različitih koncepata dostave, a sve u svetlu unapređenja efikasnosti i održivosti poštanskog sistema.

Sekcija **Telekomunikacioni saobraćaj, mreže i servisi** sadrži radove u kojima su predstavljeni rezultati aktuelnih istraživanja vezanih za rešavanje brojnih izazovnih problema iz domena savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija. U fokusu istraživanja autora našli su se problemi vezani za bezbednost softverski definisanih mreža, statističku analizu i procenu nivoa sajber napada u računarskim sistemima, analizu kvaliteta i razvoj naprednih softverskih alata za klasifikaciju video slike i obradu multimedijalnih signala. Pored toga, deo radova posvećen je istraživanjima koje se odnose na analizu, projektovanje i implementaciju telekomunikacionih mreža, servisa, protokola rutiranja i informacionih sistema u funkciji razvoja budućeg koncepta inteligentnih saobraćajno-transportnih sistema. Pojedini radovi istražuju specifične teme koje se odnose na predikciju grešaka pri satelitskom pozicioniranju, razvoj i implementaciju savremenih IoT rešenja, kao i regulatorne aspekte digitalne transformacije društva.

Editori

S A D R Ź A J

MENADŽMENT PROCESA U POŠTANSKOM I TELEKOMUNIKACIONOM SAOBRAĆAJU

Amel Kosovac, Ermin Muharemović, Adisa Medić:

INOVATIVNA RJEŠENJA U
OPTIMIZACIJI SKLADIŠNIH PROCESA..... 3

Vladeta Petrović, Biljana Stojanović-Višić, Miodrag Simić, Biljana Janeva:

DOPRINOS POŠTANSKOG SEKTORA SMANJENJU
UTICAJA KLIMATSKIH PROMENA NA ŽIVOTNU SREDINU..... 11

Nenad Bjelić, Nemanja Golubović:

ANALIZA UTICAJA STRATEGIJA ALOKACIJE
ODREDIŠTA I VELIČINE FLOTE AUTONOMNIH
MOBILNIH SORTIRNIH ROBOTA NA PROIZVODNOST
PRIMENOM SIMULACIONOG MODELA U FLEXSIM-U..... 21

Miloš Milenković, Nikola Knežević, Nebojša Bojović:

TOWARDS A PHYSICAL INTERNET:
THE IMPACT ON CEP SERVICES IN SERBIA..... 31

Milan Bukumirović, Slobodan Pećanac, Bojan Stanivuković:

TOTALNO INTEGRISANA AUTOMATIZACIJA SA IT
TEHNOLOGIJAMA I POSLOVNA KOMUNIKACIJA
U POŠTANSKIM CENTRIMA I PROCESIMA..... 43

POŠTANSKI SAOBRAĆAJ, MREŽE I SERVISI

Dragan Pejović, Ljubomir Ostojić, Sonja Gezović, Mila Milošević:

MODELI ZA UNAPREĐENJE KONKURENCIJE NA TRŽIŠTU POŠTANSKIH USLUGA.....	53
---	----

Jelena Milutinović, Đorđe Popović:

MOGUĆNOSTI I IZAZOVI DOSTAVE U ZAVISNOSTI OD TIPRA NASELJA.....	65
--	----

Nataša Čačić, Dragana Šarac, Bojan Jovanović, Estera Rakić:

ANALIZA PERFORMANSI CEP OPERATORA SA ASPEKATA ODRŽIVOSTI.....	77
--	----

Aleksandar Čupić, Mladenka Blagojević, Dejan Marković:

ANALIZA SISTEMA KOMBINOVANE DOSTAVE POŠTANSKIH POŠILJAKA.....	87
--	----

Momčilo Dobrodolac, Sara Bošković, Stefan Jovčić, Dragan Lazarević:

IZBOR ODRŽIVOG MODELA DOSTAVE KORIŠĆENJEM AROMAN VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE.....	99
--	----

TELEKOMUNIKACIONI SAOBRAĆAJ, MREŽE I SERVISI

Mirjana Stojanović, Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, Momir Manović:

BEZBEDNOST SDN MREŽA: PROBLEMI I MOGUĆA REŠENJA.....	113
--	-----

Slobodan Mitrović, Valentina Radojičić, Goran Marković:

PROGNOZIRANJE INTENZITETA <i>BRUTE-FORCE</i> NAPADA U FUNKCIJI OPTIMIZACIJE NIVOVA ZAŠTITE.....	123
--	-----

Boban Pavlović, Omar Zelmati:

OBJEKTIVNA PROCENA KVALITETA H.264, H.265 I H.266 KOMPRIMOVANIH VIDEO SEKVENCI.....	133
--	-----

Boban Bondžulić, Nenad Stojanović:

PRIMENA PRAGA JEDVA UOČLJIVIH RAZLIKA U OBJEKTIVNOJ PROCENI KVALITETA JPEG KOMPRIMOVANIH SLIKA.....	143
--	-----

Andreja Samčović, Nikola Matijašević, Marko Đogatović:

MODELI DUBOKOG UČENJA ZA KLASIFIKACIJU SLIKA PRIMENOM KONVOLUCIONIH NEURONSKIH MREŽA.....	153
--	-----

Ana Gavrovska, Aleksandar Luković:

TEHNIKE OBRADE MULTIMEDIJE U REALNOM VREMENU KOD IoT SISTEMA.....	163
--	-----

Dragan Đorđević, Miloš Končar, Periša Prokopijević, Aleksandar Dželetović:

PROJEKTOVANJE ELEKTRONSKE KOMUNIKACIONE MREŽE U FUNKCIJI BEZBEDNOSTI DRUMSKIH TUNELA.....	173
--	-----

Jelena Radović, Ana Ilić:

PROJEKTOVANJE STRUKTURE POSLOVNOG INFORMACIONOG SISTEMA INFRASTRUKTURE ŽELEZNICE SRBIJE NA DEONICI (BEOGRAD CENTAR) – STARA PAZOVA – NOVI SAD.....	181
--	-----

Nenad Jevtić, Marija Malnar, Pavle Bugarčić:

UNAPREĐENJE PROTOKOLA RUTIRANJA ZA VANET MREŽE KORIŠĆENJEM MAŠINSKOG UČENJA.....	191
---	-----

Ivana Stefanović, Snežana Mladenović, Sladana Janković, Ana Uzelac:

PRIMENA REGRESIONIH MODELA ZA PREDIKCIJU GREŠKE POZICIONIRANJA GNSS.....	201
---	-----

Nikola Milutinović, Zlatica Marinković, Zoran Stanković, Vera Marković:

IoT REŠENJE ZA POŠTANSKO SANDUČE SA
AUTOMATSKOM DOJAVOM PRIJEMA POŠILJKI.....211

Branka Mikavica, Zorka Laban:

REGULACIJA DIGITALNE
TRANSFORMACIJE - INKLUZIJA.....221

Indeks autora..... 231

**MENADŽMENT PROCESA
U POŠTANSKOM I
TELEKOMUNIKACIONOM
SAOBRAĆAJU**

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.001>

INOVATIVNA RJEŠENJA U OPTIMIZACIJI SKLADIŠNIH PROCESA

Amel Kosovac, Ermin Muharemović, Adisa Medić
Univerzitet u Sarajevu, Fakultet za saobraćaj i komunikacije,
amel.kosovac@fsk.unsa.ba, ermin.muharemovic@fsk.unsa.ba, adisa.medic@fsk.unsa.ba

Abstract: *U savremenom svijetu u kojem tehnologija neprestano napreduje, industrijska automatizacija postaje sveprisutna. S obzirom na ključnu ulogu skladišta u lancu opskrbe, optimizacija procesa skladišta postaje od suštinskog značaja za efikasnost distribucijskih, logističkih sistema i lanaca opskrbe. Rad se bavi istraživanjem skladišnih procesa i analizom primjene inovativnih tehnologija s posebnim fokusom na identifikaciju i razumijevanje osnovnih karakteristika ovih tehnologija. Od tehnoloških dostignuća poput RFID-a i beacon-a do implementacije automatizovanih vozila i robota, inovacije u skladištima imaju dubok uticaj na razvoj logistike i logističkih centara. Glavni cilj rada usmjeren je na razumijevanju kako ove tehnologije funkcionišu i kako doprinose poboljšanju efikasnosti skladišta, doprinoseći tako evoluciji globalnih logističkih lanaca i distribucijskih sistema.*

Key words: *skladište, tehnologija, automatizacija, skladišni procesi, skladišna oprema*

1. Uvod

Tehnologija ima moć da utiče i oblikuje moderne aspekte života i kao takva ubrzala je i pojednostavila sve zadatke današnjice. Te tehnologije našle su primjenu i u skladištima i njihovim procesima, a kroz ovaj rad ćemo se upoznati sa navedenim. Skladište možemo predstaviti kroz najjednostavnije formulisan način, kao posebno uređene i tehnički opremljene prostore koji služe za prihvatanje, evidentiranje, čuvanje, doradu, oplemenjivanje i primopredaju robe u saobraćaju ili procesu proizvodnje. Optimizacija zadataka igra vitalnu ulogu u skladišnom sistemu. Od biranja robe do raspoređivanja na policama i paletama, svi zadaci moraju biti optimizirani na način koji konstruktivno poboljšava tok lanca opskrbe.

Konceptualno, rad se sastoji od četiri logički povezanih poglavlja. Nakon uvodnog dijela drugo poglavlje bazirano je na skladišne procese. Svaki navedeni proces je pobježe objašnjen; radnje koje se javljaju u procesima i njihova važnost u procesu skladištenja.

Inovativne tehnologije zamjenjuju obavljanje velikog dijela poslova u današnje vrijeme. Netaknuta nisu ostala ni skladišta, a ni procesi unutar istih. Treće poglavlje

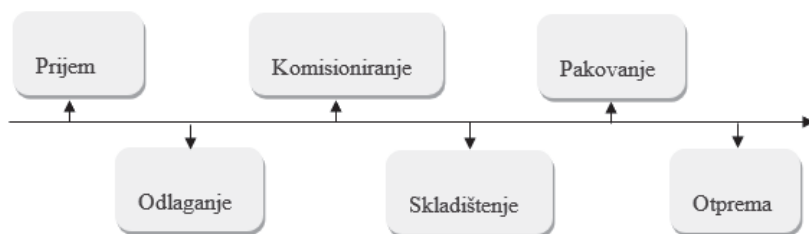
posvećeno je upravo tome; savremenoj tehnologiji koja mijenja načine poslovanja i poboljšava obavljanje većeg broja operacija unutar skladišta. Od bar kod tehnologija i RFID-a, robota koji rade zajedno sa ljudima, do funcionisanja i vrsta sistema za upravljanje skladištem.

U četvrtom poglavlju rada, data su zaključna razmatranja.

2. Skladišni procesi

Skladišni prostor, kao i procesi koji se obavljaju unutar njega, su od iznimne važnosti za distribuciju i sam lanac opskrbe. Proces unutar skladišta nastoje se organizovati tako da se omogući neprestani protok robe kroz skladište, bez ponavljanja pojedinih operacija. Skladišni sistem nastoji se organizovati na način da se u svakoj fazi procesa skladištenja zna pozicija i količina pojedinog artikla, da bi se u najkraćem vremenu moglo odgovoriti na zahtjeve korisnika.

Može se izdvojiti šest osnovnih skladišnih procesa koji obuhvataju prijem, odlaganje, skladištenje, komisioniranje, pakovanje i otpremu (Slika 1).



Slika 1. Osnovni skladišni procesi [1]

U osnovne procese se još ubrajaju i nadopunjavanje, akumuliranje i sortiranje, pakiranje i cross-docking. Prijem robe i pohrana smatraju se ulaznim procesima, dok se ostali smatraju izlaznim.

Prijem je prvi proces skladištenja i jedan od najvažnijih. Da bi se proces prijema obavio pravilno, skladište bi trebalo biti u mogućnosti da potvrdi da je primilo pravi proizvod, u pravoj količini, u pravom stanju i u pravo vrijeme. Ako se to ne učini, to će imati enormne posljedice na sve naredne operacije. Prijem uključuje i prijenos odgovornosti za robu na skladište. Cilj optimizacije procesa prijema skladišta je da se teret primi efikasno i pravilno i da se izbjegne nagomilavanje na prihvatnim dokovima. Softveri kao što su sistemi za upravljanje radom i raspoređivanje pristajanja omogućavaju da se pravilno raspoređuje prava količina osoblja preciznim predviđanjem predstojećih pošiljki [2].

Odlaganje je drugi proces koji se odvija u skladištima i predstavlja kretanje robe od prihvatnog pristaništa do najoptimalnije skladišne lokacije. Cilj optimizacije procesa odlaganja je da se roba premjesti za skladištenje na njihovu najoptimalniju lokaciju na brz, efikasan i efikasan način. Softver kao što su sistemi za prerezivanje i upravljanje prostorom automatski dodjeljuju optimalne prostore za svaki teret kako bi se omogućio pojednostavljen proces odvoza i maksimalno korištenje prostora. Osim toga, mobilne aplikacije i uređaji za skladištenje usmjeravaju službenike da skladište teret na pravou lokaciji [3].

Skladištenje je jedan od procesa skladištenja robe, u kojem se roba stavlja u svoj najprikladniji skladišni prostor. Kada se pravilno obavi, proces skladištenja u potpunosti maksimizira raspoloživi prostor u vašem skladištu i povećava efikasnost rada. Korištenje

pravog skladišnog skladišnog sistema u skladu sa veličinom objekta i miksom proizvoda omogućava da se maksimiziraju horizontalni i vertikalni prostori uz poboljšanje efikasnosti skladišta [2].

Komisioniranje je proces skladištenja koji prikuplja proizvode u skladištu kako bi ispunio narudžbe kupaca. Jedan od načina za optimizaciju procesa komisioniranja jeste uvođenje pravih tehnologija. Tehnologije poput mobilnih i nosivih uređaja mogu pojednostaviti proces komisioniranja jer omogućavaju službenicima da bežično pregledaju otpremne liste, pristupe sistemima u realnom vremenu i skeniraju bilo gdje u skladištu [2].

Pakovanje je proces skladištenja koji objedinjuje odabrane artikle u prodajni nalog i priprema ih za otpremu kupcu. Jedan od primarnih zadataka pakovanja je da osigura da su oštećenja svedena na minimum od trenutka kada artikli napuste skladište. Optimizacija procesa pakovanja može se obaviti korištenjem softvera za usmjeravanje ljudi u izvršavanju zadataka. Pod uslovom da sistem za pakovanje ima sve potrebne podatke, kao što su dimenzije i težina, sistem može automatski odrediti vrstu i količinu ambalažnog materijala koji će čuvati artikl i troškove pakovanja niskim [2].

Otprema je završni proces skladištenja i početak putovanja robe od skladišta do kupca. Dostava se smatra uspešnom samo ako je ispravna narudžba sortirana i utovarena, otpremljena pravom kupcu, prođe kroz pravi način tranzita i isporučena sigurno i na vrijeme. Posjedovanje mobilne aplikacije i uređaja za isporuku omogućava da se imaju prave informacije pri ruci i u realnom vremenu za provjeru pošiljki u hodu [2].

3. Pregled inovativnih rješenja

Tehnologija transformiše skladišta, podržavajući manje, agilnije operacije i omogućavajući skladištima da ponude brzu isporuku i narudžbe bez grešaka – elemente koji su ključni za uspjeh operacije isporuke.

Prednosti uvođenja tehnologije u skladišta su npr. poboljšana kontrola, smanjeni operativni troškovi, manje nezgoda na radu, mogućnost koordiniranja tokova proizvoda kako bi se izbjegla uska grla, ušteda energije i radne snage, bolje iskorištenje prostora, te manje ručnog rukovanja.

3.1. Senzori i automatski identifikatori

Automatska identifikacije je uvijek povezana sa automatskom akvizicijom podataka, odnosno zahvatanjem podataka i njihovim prosljeđivanjem za dalju (uglavnom računarsku) obradu bez posredstva operatera. Glavne tehnologije koje spadaju u automatsku identifikaciju su: bar-kod, smart kartice, prepoznavanje glasa, neke biometrijske metode (na pr. identifikacija pomoću retine), prepoznavanje oblika i identifikacija pomoću radio talasa – RFID [4].

3.1.1. Barkod

Barkod je optičko predstavljanje podataka (slova i/ili brojeva) koji se mogu čitati pomoću optičkih skenera koji se zovu bar kod čitači ili mogu biti skenirani sa slike uz pomoć posebnih softverskih alata. Koristi se u procesu identifikacije proizvoda, vozila, vagona, paketa, robe i sl., u postupku bilo kakvog kretanja/prolaska kroz određeni prostor [5]. Prednosti ove tehnologije su relativno male investicije, a mogu se primijeniti na razna softverska rješenja, od lokalno razvijenih rješenja u suradnji s ERP (*eng. Enterprise*

Resource Planing) dobavljačima do složenih WMS (*eng. Warehouse Management System*) skladišnih rješenja [6].

Danas postoji pet verzija UPC (*eng. Universal Product Code*) bar koda, označene od A do E. Verzija A UPC bar koda ima 10 cifara i dvije cifre sa strana. Prvih pet cifara sa lijeve strane označavaju proizvođača, dok drugih pet cifara sa desne strane označavaju proizvod. Karakter sa krajnje lijeve strane predstavlja klasifikacioni broj, dok karakter sa desne strane predstavlja kontrolnu oznaku. Kako bi kod bio kompatibilan sa EAN (*eng. European Article Number*) sistemom dodata je još jedna cifra, nazvana vodeća nula. I UPC i EAN simboli su fiksne dužine, generišu samo brojeve, predstavljaju kontinualne simbologije i koriste širinu četiri elementa. Verzija koja se najviše koristi poslije osnovne je verzija E. UPC označava „univerzalni kod proizvoda“ (UPC-A), dok EAN označava „evropski broj artikla“ (EAN-13 ili međunarodni broj artikla) [7].

3.1.2. Beacon tehnologija

Bluetooth beacon je hardverski uređaj zasnovan na Bluetooth Low Energy protokolu emitovanja, koji je kompatibilan sa iBeacon protokolom ili Eddystoneom. Kao BLE (*eng. Bluetooth Low Energy*) uređaj, Bluetooth beacon se obično instalira na određenoj lokaciji u prostoriji kao referentna tačka za unutrašnju lokaciju. Nije povezan ni sa jednim glavnim uređajem, ali emituje kontinuirano i periodično u okolno okruženje, zahtijevajući samo skeniranje i raščlanjivanje od strane glavnog uređaja [8].

Glavna svrha pozicioniranja u zatvorenom prostoru nije samo za navigaciju već i za upravljanje lokacijom osoblja, opreme i materijala. Bluetooth beacon dolazi s prednostima u maloj veličini, visokim performansama i omjeru cijene pod istom preciznošću. Osim toga, na Bluetooth manje utiče okolno okruženje, a njegova potrošnja energije je relativno niska. Beacons mogu biti posvuda u skladištima, uključujući prikolice, viljuškare, police, pa čak i utovarne stanice, koje mogu emitovati informacije raznim pametnim uređajima na određenoj udaljenosti [9].

3.1.3. RFID

RFID (*eng. Radio Frequency Identification*) tehnologija zamišljena je kao jednostavna zamjena barkodova gdje bi se identifikacija proizvoda vršila bežičnim putem, preko radio talasa [10]. Korištenjem takvog sistema uklanjaju se određena ograničenja koja postoje kod korištenja barkodova kao što su npr. potreba za time da bar kod bude izravno vidljiv čitaču, mala udaljenost na kojoj se može očitavati, problemi s istrošenošću ili oštećenjima naljepnica s oznakama bar kodova i sl. Problem, koji se danas nastoji riješiti uvođenjem RFID tehnologije, je – kako pratiti jedinstveni proizvod od njegovog nastanka do krajnjeg potrošača. Standardni bar-kod identifikuje samo proizvođača i proizvod, ali ne i jedinstveni artikal. Barkod na omotu čokolade je isti na svakom omotu iste vrste čokolade, pa je nemoguće putem samog bar-koda izdvojiti tačno određeni proizvod. RFID transponder, naprotiv, nosi identifikator – serijski broj jedinstven samo za taj specifični proizvod. Za sada RFID ne mora u potpunosti zamijeniti postojeći sistem identifikacije i praćenja baziran na bar-kodu, ali ga može uspješno dopunjavati [4].

3.1.4. Pick to Light

Pick-to-light sistemi (Slika 2) koriste svjetlosne uređaje koji usmjeravaju radnike gdje da izvuku artikle iz skladišta. Pruža jasnu svjetlosnu indikaciju koja pokazuje odakle treba što uzeti te ima senzor koji provjerava da li je odabran pravi predmet.



Slika 2. Pick to light u skladištu [11]

Pick to Light zasloni zamjenjuju uobičajene liste za brzo i jednostavno izdvajanje proizvoda za određenog kupca, tj. dostavno mjesto. Pored navođenja distributera za određenu lokaciju, zasloni precizno pokazuju i naručenu količinu te zahtijevaju potvrdu za svaki uzeti proizvod [6].

3.1.5. Glasovno upravljanje

Glasovno upravljanje je metoda za korištenje verbalnih naredbi za pomoć skladišnim radnicima u ispunjavanju narudžbi. Obično su sistemi glasovnog upravljanja integrisani sa sistemom upravljanja skladištem ili softverom za planiranje resursa preduzeća. Svaki zaposlenik je opremljen mobilnim uređajem ili govornim terminalom te slušalicama s mikrofonom. Može se dodati i žičani ili bežični skener bar koda za povećanje tačnosti i produktivnosti. Uređaji su opremljeni mikrofonom kako bi zaposlenik mogao vratiti informacije u sistem [12].

3.2. Automatizacija i robotizacija

3.2.1. Automatski navođena vozila

Automatski navođena vozila AGV (*eng. Automated Guided Vehicle*) transportni su sistemi bez vozača koji se koriste za horizontalno kretanje materijala (Slika 3). Radi se o industrijskim vozilima bez vozača, koja su najčešće pogonjena pomoću električnih motora, a napajana pomoću baterijskih izvora energije [6]. AGV-u je potrebno samo 8 minuta da se napuni, što znači da provode vrlo malo vremena bez rada [13]. Automatska vođena vozila pomažu u transportu materijala, zaliha i inventara unutar skladišnih objekata. AGV se koriste u operacijama za zamjenu viljuškara s ručnim pogonom ili kolica. Neki AGV autonomno upravljaju skladišnim objektima prateći utvrđene rute koje su označene žicama, magnetnim trakama, tragovima, senzorima ugrađenim u pod ili drugim fizičkim vodičima. Drugi AGV-ovi koriste kamere, lidar, infracrvene i druge napredne tehnologije za navigaciju radnim prostorima, identifikaciju prepreka i izbjegavanje sudara.

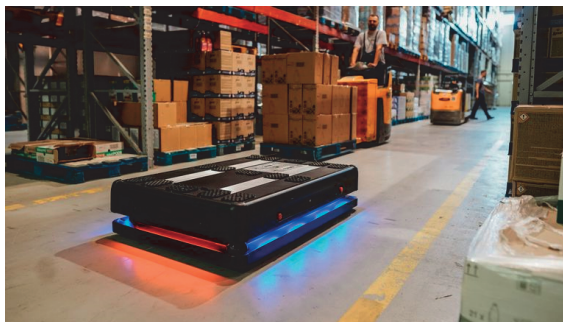


Slika 3. AGV vučna vozila [14]

Automatski vođena vozila za prijevoz jediničnih tereta vozila s utovarnim prostorom je također vrsta vozila koja služi za transport robe koja se utovara na postolje koje se nalazi na vozilu i prevozi se. Ova vozila nazivaju se i vozila jediničnih tereta (palete, kutije, pojedinačni komadi), a najčešće imaju i automatski pretovar (pomoću podiznog stola, lančanog, trakastog ili valjčanog konvejera). Primjenjuju se kod transporta na kraće udaljenosti visokim protokom, a zbog sposobnosti automatskog povezivanja s konvejerima, radnim stanicama, strojevima i AS/RS sistemima često su integrirani u automatizirani proizvodni ili skladišni sistem [14]. Usvajanjem automatizovanih sistema, skladišta mogu: smanjiti ljudsku grešku, minimizirati rad, poboljšati koordinaciju rukovanja materijalom, poboljšati sigurnost na radnom mjestu, povećati kontrolu zaliha, poboljšati korisničku uslugu [15].

3.2.2. Autonomni mobilni roboti

Signaliziraju se novi oblici automatizacije kao što su robotsko paletiranje/depaletiranje te autonomni mobilni roboti AMR (*eng. Autonomous Mobile Robots*). Autonomni mobilni roboti (Slika 4.) su poput AGV-a po tome što koriste senzorsku tehnologiju za isporuku zaliha oko skladišta. Međutim, za razliku od AGV-a, oni ne zahtijevaju postavljenu stazu ili unaprijed postavljenu rutu između lokacija. Ovi mali i okretni roboti imaju sposobnost da identifikuju informacije na svakom paketu i precizno ih sortiraju. AMR-ovi se mogu kretati po cijelom skladištu jer kreiraju vlastite rute na osnovu potrebne operacije. Oni mogu promijeniti rutu kada je to potrebno i izbjeći prepreke u svom okruženju [16]. Ovi roboti nude efikasnost, tačnost i sigurnost tokom procesa sortiranja.



Slika 4. Autonomni mobilni roboti u skladištima [17]

3.3. Sistem za upravljanje skladištima

Sistemi upravljanja skladištem WMS omogućavaju kontrolu, nadgledanje i optimizaciju ključnih funkcija skladišta. To uključuje: praćenje inventara, usmjeravanje aktivnosti sakupljanja, pakiranja i otpreme, te koordiniranje opreme za rukovanje materijalom. Integrirani WMS obično je dodatak već postojećeg pružatelja usluga planiranja resursa poduzeća ERP. ERP sistemi upravljaju fakturisanjem, računovodstvom i praćenjem zaliha. Sistem za upravljanje skladištem preuzima narudžbe i usmjerava proces komisioniranja, popisa te zaprimanja i otpreme proizvoda. Kada se sve može integrisati u jedan sistem, puno je lakše pratiti u koje je narudžbe najbolje uložiti novac.

4. Zaključak

S obzirom na potrebu za bržim, preciznijim i efikasnijim skladišnim operacijama, inovativne tehnologije postaju neprocjenjivo sredstvo za optimizaciju skladišnih procesa. Automatizacija skladišta predstavlja ključnu komponentu budućnosti industrije opskrbnih lanaca i odnosi se na skup tehnologija (u rasponu od robota do procesa) koje dovode do mnogo veće razine produktivnosti. Napredak tehnologije otvara put brojnim trendovima u automatizaciji skladišta koji podržavaju učinkovitost skladišta, poboljšavaju tačnost i povećavaju sigurnost.

Međutim, koliko god težili automatoizaciji poslovanja, još uvijek ljudski radi igra glavnu ulogu u svemu. Tehnologije koje se javljaju i uvode, pomažu ljudskoj radnoj snazi, rame uz rame, ali ih nisu u potpunosti zamijenile. Možda će uskoro doći vrijeme kada će robotika i automatizacija zamijeniti ljudsku radnu snagu u industriji logistike i distribucije, ali do toga još nije došlo. U međuvremenu, nove tehnologije mogu pomoći u poboljšanju učinkovitosti i olakšati posao timovima uz istovremeno smanjenje otpada i troškova.

Literatura

- [1] D. Matanović, "Optimizacija skladišnih procesa i nacrt skladišta u maloprodajnoj tvrtki," Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.
- [2] H. Sunol, "Cyzerg Warehouse Tehnology," 12 september 2022. [Na mreži]. Available: <https://articles.cyzerg.com/warehouse-processes-how-to-optimize-them>. [Poslednji pristup 24 november 2022].
- [3] Panatrack, "Panatrack," 2022. [Na mreži]. Available: <https://www.panatrack.com/bin-tracking-with-put-away/>. [Poslednji pristup 24 november 2022].
- [4] D. Regodić, Logistika, Beograd: Univerzitet Singidunum, 2014.

- [5] "Wikipedia," [Na mreži]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Barcode>. [Poslednji pristup 15 march 2023].
- [6] L. Stojanović, Unutrašnji transport i skladištenje, Varaždin: Sveučilište Sjever, 2016.
- [7] "Barcodes talk," 6 september 2009. [Na mreži]. Available: <https://www.barcodestalk.com/learn-about-barcodes/resources/what-difference-between-upc-and-ean>. [Poslednji pristup 18 march 2023].
- [8] V. Nakum, "TROOTECH," 23 november 2020. [Na mreži]. Available: <https://www.trootech.com/blog/beacon-based-inventory-management-application>. [Poslednji pristup 27 april 2023].
- [9] D. Tang, "Moko blue," MOKO, 22 june 2022. [Na mreži]. Available: <https://www.mokoblue.com/how-to-optimize-warehouse-management-solution-with-beacon-technology/>. [Poslednji pristup 27 april 2023].
- [10] Kosovac, A., & Muharemović, E. (2022). Procesi logističkih sistema. Fakultet za saobraćaj i komunikacije Univerziteta u Sarajevu.
- [11] "pick to light," [Na mreži]. Available: <https://www.picktolightsystems.com/en/picking-products/pick-by-light>. [Poslednji pristup 11 may 2023].
- [12] "Dematic," Real Time Logistics, [Na mreži]. Available: <https://www.realtimelogistics.com.au/>. [Poslednji pristup 11 may 2023].
- [13] "LOGIWA," [Na mreži]. Available: <https://www.logiwa.com/blog/warehouse-robotics>. [Poslednji pristup 27 april 2023].
- [14] M. Vidak, "Primjena automatski vođenih vozila u skladištima," Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [15] Cogner, "Cogner," Cogner, 2023. [Na mreži]. Available: <https://www.conger.com/warehouse-automation-trends/>. [Poslednji pristup 12 april 2023].
- [16] Kosovac, A., Muharemović, E., Čolaković, A., Lakača, M., & Šimić, E. (2021). Bosnia and Herzegovina market research on the use of autonomous vehicles and drones in postal traffic. Science, Engineering and Technology, 1(2), 32-37.
- [17] "Zimo.dnevnik," [Na mreži]. Available: <https://zimo.dnevnik.hr/clanak/hrvatski-autonomni-roboti-zaposleni-i-u-orbicu---574952.html>. [Poslednji pristup 27 april 2023].

Abstract: *In the modern world, where technology is constantly advancing, industrial automation is becoming ubiquitous. Given the crucial role of warehouses in the supply chain and production, optimizing warehouse processes is essential for the efficiency and effectiveness of distribution, logistics systems, and supply chains. The paper focuses on the study of warehouse processes and the analysis of the application of innovative technologies, with a particular emphasis on identifying and understanding the basic characteristics of these technologies. From technological achievements such as RFID and beacons to the implementation of automated vehicles and robots, innovations in warehouses have a profound impact on the development of logistics and logistics centers. The main goal of the paper is to understand how these technologies operate and how they contribute to improving warehouse efficiency, thereby advancing the evolution of global logistics chains and distribution systems.*

Keywords: *warehouses, technology, automation, warehouse processes, warehouse equipment*

INNOVATIVE SOLUTIONS IN WAREHOUSE PROCESS OPTIMIZATION

Amel Kosovac, Ermin Muharemović, Adisa Medić

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.002>

DOPRINOS POŠTANSKOG SEKTORA SMANJENJU UTICAJA KLIMATSKIH PROMENA NA ŽIVOTNU SREDINU

Vladeta Petrović¹, Biljana Stojanović-Višić², Miodrag Simić³, Biljana Janeva⁴

¹Univerzitet u Beogradu - Visoka škola strukovnih studija za informacione i
komunikacione tehnologije, Beograd, vladeta.petrovic@ict.edu.rs

²Univerzitet "Union - Nikola Tesla" - Fakultet za inženjerski menadžment, Beograd,
biljana.svisic@fim.rs

³Javno preduzeće „Pošta Srbije“, Kruševac, miosimic@jp.ptt.rs

⁴OHRID Institute for Economic Strategies and International Affairs, Skopje, Macedonia,
b.janeva@oi.org.mk

Rezime: *Uticaj klimatskih promena na životnu sredinu je sveprisutan i trajan. Kolika je uloga i obim poštanskog sektora u doprinosu smanjenja uticaja klimatskih promena na životnu sredinu, prezentovaće rezultati ovog istraživanja. Poštanski sektor svoje delovanje u pravcu smanjenja uticaja klimatskih promena na životnu sredinu sprovodi na osnovu Ciljeva održivog razvoja (Sustainable Development Goals - SDGs), koji su kreirani Agendom održivog razvoja 2030 od strane Ujedinjenih Nacija (United Nations - UN). Doprinos poštanskog sektora smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu sagledaćemo kroz analizu dostupnih izveštaja Svetskog poštanskog saveza (Universal Postal Union - UPU), Asocijacije javnih poštanskih operatora PostEvropa (PostEurop), Međunarodne poštanske korporacije (International Post Corporation - IPC), kao i reprezentativnih poštanskih operatora, što u budućnosti može i nacionalnom poštanskom operatoru (Javno preduzeće „Pošta Srbije“) dati značajan okvir u sagledavanju njegovog budućeg delovanja.*

Ključne reči: *klimatske promene, životna sredina, poštanski sektor, poštanski operator*

1. Uvod

Sve veći deo društva postaje svestan klimatskih promena. Klimatske promene su posledica narušene ekološke ravnoteže. Nova društvena spoznaja formira novi vrednosni sistem shvatanja, mišljenja, ponašanja i delovanja u očuvanju prirodnog okruženja. Narušavanje ekološke ravnoteže dovodi do ekološke krize koja ugrožava postojanje ljudske civilizacije savremenog sveta u postojećem obliku.

Ekološka kriza može se ublažiti jedino ako se usvoji drugačiji sistem vrednosti i u središte tog sistema stave eko-humanističke vrednosti. Da bi se to postiglo, potrebno je sve sektore privrede, prevesti ka tom sistemu vrednosti. Evropska komisija je kroz

Evropski zakon o klimi preuzela političku obavezu da do 2050. godine, svede emisiju gasova sa efektom staklene bašte na nulu.

Ovaj rad daje odgovor na dva u osnovi postavljena zadatka: prvi, da predstavi osnovne forme smanjenja uticaja klimatskih promena na životnu sredinu od strane izabranih poštanskih operatora Nemačke, Kanade i Australije; drugi, da uoči i pruži pregled relacija koje postoje među njima, a ogledaju se u sličnostima i razlikama. Odgovor na postavljene zadatke proizilazi iz korišćenja sledećih kriterijuma: ekonomskog, socijalnog i ekološkog. Tačnije rečeno, posmatrana je primena preporuka Svetskog poštanskog saveza, Asocijacije javnih poštanskih operatora PostEvropa i Međunarodne poštanske korporacije, kao i njihova primena kod poštanskih operatora u njihovim transportnim mrežama u dostavi i isporuci, čime se smanjuje uticaj klimatskih promena kroz smanjenje emisija ugljenika. Na kraju rada su zaključna razmatranja, koja bi mogla biti od koristi poštanskim operatorima u Republici Srbiji.

2. Doprinos poštanskog sektora smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu

Poštanski sektor ulaže ne tako mala sredstva u razvoj tehnoloških rešenja koja imaju malu količinu emisije ugljenika za dostavu i isporuku pošiljaka. Dostava u gradskim centrima vrši se peške, tradicionalnim ili električnim biciklom, ili kroz neemisione i objedinjene sisteme isporuke. Za dostavu i isporuke na većim rastojanjima, vozni park (flota) se postepeno sve više zamenjuje električnim kombijima ili vozilima na alternativne izvore napajanja. Takođe, poštanski sektor ima dugogodišnje iskustvo u razvoju električnih vozila po meri, uzimajući u obzir potrebe poštanskih radnika koji dostavljaju artikle e-trgovine.

Aktivnosti koje preduzima poštanski sektor na smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu mogu se svrstati u sledeće kategorije:

- vozni park se prebacuje na vozila sa alternativnim gorivom i električnim napajanjem kako bi se smanjila emisija gasova sa efektom staklene bašte,
- pribegava se korišćenju obnovljivih izvora energije,
- poslovanje se zasniva na principima cirkularne ekonomije odnosno insistira se na reciklaži,
- prostor i objekti koji se koriste bivaju energetski efikasni, i
- primenjuju se tehnološka rešenja kako bi dostava i isporuka paketa i pisama bila klimatski efikasna.

Poštanski sektor zauzima svojim aktivnostima posebno mesto u borbi protiv klimatskih promena, kao i smanjenju njihovog uticaja na životnu sredinu, pri čemu daje primer drugim industrijama.

Doprinos poštanskog sektora smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu sagledan je kroz dostupne izveštaje Svetskog poštanskog saveza (*Universal Postal Union - UPU*), Asocijacije javnih poštanskih operatora PostEvropa (*PostEurop*) i Međunarodne poštanske korporacije (*International Post Corporation - IPC*).

2.1. Doprinos Svetskog poštanskog saveza

Svetski poštanski savez je osnovan 1874. godine kao osnovni forum za međusobnu saradnju između svih učesnika poštanskog sektora na globalnom nivou.

Sedište je u Bernu, u Švajcarskoj. Čine ga 192 države članice. Svoj rad posvećuje i pozivanju Agende održivog razvoja 2030. Održivi razvoj je bitan činilac poslovanja poštanskog sektora, te Svetski poštanski savez svesrdno podržava poštanske operatore da poštuju principe održivog razvoja i doprinose smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu, a samim tim i poboljšavaju svoju poslovnu efikasnost, jačaju odnose sa korisnicima svojih usluga i aktivno rade na razvoju novih tržišta za asortiman usluga kojima raspolažu.

Zaštita životne sredine se zasniva kroz praćenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, kao i omogućavanje poštanskim operatorima da analiziraju dobijene podatke i preduzmu konkretne mere povezane sa njihovim aktivnostima, kako bi se negativni efekti po životnu sredinu izbegli. Poštanski operatori država članica Svetskog poštanskog saveza poseduju više od 1 milion vozila i oko 800.000 zgrada te stoga imaju i te kako značajan uticaj na životnu sredinu. U mnogim zemljama, poštanski operatori su ujedno i vlasnici najvećih voznih parkova ili flota na nacionalnom nivou, pa su kao takvi prilično odmakli u primeni održivih praksi kojima štite životnu sredinu. Pre svega prelaze na alternativna vozila prvenstveno na električni pogon, koriste obnovljivu energiju iz sopstvenih izvora, dok su u svoje poslovanje ugradili elemente održivog poslovanja, a što u procesima nabavki zahtevaju i od svojih dobavljača. Kako globalno posmatrano imamo i trend rasta e-trgovine, te je sve veća potražnja korisnika za održivim proizvodima i uslugama, a što uključuje klimatski efikasnu dostavu i isporuku.

Svetski poštanski savez poseduje monitoring emisije gasova sa efektom staklene bašte u poštanskim operacijama širom sveta, putem prilagođene platforme za izveštavanje o ugljeniku: OSCAR.post (*Online Solution for Carbon Analysis and Reporting - OSCAR*). Platforma OSCAR.post (Slika 1) je interaktivna, a poštanski operatori dobijaju podatke koje mogu da analiziraju i izveštavaju o svojim emisijama ugljenika, kao i da identifikuju mogućnosti ublažavanja tih efekata na životnu sredinu u kojoj poslovno deluju [1].



Slika 1. Platforma Svetskog poštanskog saveza za izveštavanje o ugljeniku: OSCAR.post [1]

2.2. Doprinos Asocijacije javnih poštanskih operatora PostEvropa

Asocijacija javnih poštanskih operatora PostEvropa je udruženje Evropskih javnih poštanskih operatora osnovano 1993. godine. Sedište udruženja je u Briselu, u

Belgiji. Ima 55 članice u 53 države i teritorije koje zajedno pružaju usluge na oko 175.000 šaltera, zapošljavaju oko 2 miliona ljudi i povezuju oko 800 miliona ljudi dnevno. Univerzalna poštanska usluga stiže do svih građana na preko 258 miliona mesta isporuke.

PostEvropa promovira zaštitu životne sredine u centru svojih aktivnosti, kako bi se smanjio negativan uticaj gasova sa efektom staklene bašte, sa posebnim naglaskom na energetske efikasnost zgrada i transporta do nulte emisije predviđene za sredinu ovog veka. Od 22 nacionalna operatora koji su učestvovali u anketi 2021. godine skoro 80% poštanskih operatora je preduzelo aktivnosti za implementaciju održivih politika sa specifičnim obavezama, u pogledu energetske efikasnosti, dekarbonizacije prevozne flote, i drugih inovativnih rešenja kako bi se smanjio uticaj klimatskih promena na životnu sredinu. Energetska efikasnost se postiže smanjenjem utroška energije u zgradama, što je ključno za poštanske operatore, zbog razgranate mreže poštanskih centara i jedinica poštanske mreže, kao i kancelarija, i dr. poslovnih prostora. Oko 60% poštanskih operatora koristi obnovljivu energiju za sopstvenu potrošnju (solarni paneli na zgradama), dok 77% energije koju koriste dolazi iz obnovljivih izvora. Dekarbonizacija prevozne flote PostEvrope (Slika 2) sprovodi se korišćenjem vozila na električni, vodonični ili pogon na biogorivo. Poštanski operatori PostEvrope imaju preko 100.000 bicikala i bicikala na električni pogon, a preko 170.000 zaposlenih dostavu vrši peške. Za prenos pošiljaka koriste preko 58.000 vozila na pogon sa alternativnim gorivima, od čega 30.000 vozila je na električni pogon, a što sve iziskuje dobru infrastrukturu za alternativno snabdevanje energijom i punjenje gorivom da bi tranzicija uspeła.



Slika 2. Dekarbonizacija prevozne flote PostEvrope [2]

Inovativna rešenja za smanjenje emisije ugljenika sprovode se i kroz ponudu održivih proizvoda odnosno usluga, a većina poštanskih operatora dobrovoljno vrši kompenzaciju svojih emisija ugljenika. Upotreba tehnologije za optimizovanje ruta, planiranje i objedinjavanje vozila omogućava da se smanji broj pređenih kilometara. Kako bi se smanjio broj neuspelih pokušaja dostave poštanski operatori uvode: planiranje i optimizovanje kućne dostave, kao i povećanje broja ormarića za pakete (paketomata), čiji se broj povećao za 30% u periodu 2018-2020. godine. Takođe, poštanski operatori PostEvrope su implementirali upravlje otpadom i daju primat principima cirkularne ekonomije u pogledu: pakovanja, papira, plastike, vozila, baterija i električne opreme. Za ambalažu pri pakovanju koriste se one, koje imaju višekratnu upotrebu. Vodi se računa o smanjenju upotrebe papira, dok se upotrebljava i plastika koja se može reciklirati. Može se reći da su poštanski operatori PostEvrope posvećeni pružanju održivih, efikasnih i inovativnih poštanskih usluga širom Evropske unije i šire. Isto tako, ulažu u razvoj novih usluga, kao i promociju klimatski efikasne dostave i isporuke poštanskih pošiljaka kako bi odgovorili na trenutne društvene, ekološke i ekonomske izazove savremenog sveta [2].

Poštanski sektor ima značajnu ulogu u smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu, tako da su i pojedine članice PostEvrope tokom 2022. godine sprovodile određene aktivnosti u tom pravcu. Predstavimo iskustva poštanskih operatera: Austrije, Belgije, Danske, Finske, Francuske, Holandije, i Španije [3].

Poštanski operator Austrije (*Österreichische Post AG*) u saradnji sa Univerzitetom primenjenih umetnosti i pet renomiranih maloprodajnih objekata radi na testiranju 4 različita održiva pakovanja za e-trgovinu koja su napravljena od obnovljivih materijala ili reciklirane PET ambalaže i mogu biti ponovo korišćena između 10 i 100 puta. Na ovaj način Pošta Austrije takođe želi da doprinese cirkularnoj ekonomiji u pogledu pitanja ambalaže, preuzimanjem odgovarajućih mera za smanjenje otpada.

Poštanski operator Belgije (*Bpost*) uvodi u svoj vozni park dvostruke prikolice za prevoz paketa. Do 2030. planiraju kupovinu više od 320 prikolica na sprat. Ovo će pomoći smanjenju voznog parka (flote), a time i za 30% manje pređenih kilometara sa ovim prikolicama. Zatim, združivanje paketa i paleta u gradu Antverpenu putem programa *CULT - Collaborative Urban Logistics & Transport*, smanjilo je emisiju gasova sa efektom staklene bašte na isporuci za 90% odnosno za 25% je smanjena pređena kilometraža.

Poštanski operator Danske (*Post Danmark A/S*) je tokom 2021. godine na ostrvu Bornholm zamenio 16 vozila na dizel gorivo za distribuciju paketa i pisama sa isto toliko vozila na električni pogon. Tokom 2022. godine instalirano je i sotersko rešenje za punjenje vozila, a čija se iskustva koriste za dalju elektrifikaciju voznog parka Postnord-a. Takođe je implementirano i rešenje kontrole grejanja, jer je grejanje najveći izvor potrošnje energije, a instalirano je i LED osvetljenje u objektima radi uštede energije.

Poštanski operator Finske (*Posti Group Oyj*) isporuku paketa u glavnom gradu Helsinkiju vrši sa 100% električnim vozila bez emisije ugljenika sa ciljem da do 2030. godine ima nulti ugljenični otisak. Ušteda se ogleda na godišnjem nivou od 44.500 litara dizel goriva ili 100 tona manje emisije CO₂. Cilj je da se sva isporuka paketa vrši bez emisije CO₂.

Poštanski operator Francuske (*La Poste Groupe*) među prvim poštanskim operatorima implementirao je plan za biodiverzitet kao treći stub svoje ekološke politike. Ovaj se plan realizuje kroz tri ose: prva da je potrebno uspostaviti grupno upravljanje biodiverzitetom, pa ga uklopiti u upravljanje društveno odgovornim poslovanjem; druga da se smanji pritisak na biodiverzitet aktivnostima u okviru La Poste Groupe u Francuskoj i u inostranstvu; treća da se građani edukuju u očuvanju biodiverziteta. Na ovaj način poštanski operator dodatno podiže svest o uticaju svojih aktivnosti na živa bića trudeći se da njegova praksa bude uzorna.

Poštanski operator Holandije (*PostNL*) je u svom međunarodnom sortirnom centru koristio i do 7 km folije dnevno za obezbeđenje robe odnosno pošiljki u kontejneru. Uvođenjem inovativnog rešenja višekratnih i cirkularnih kesa (torbi) bilo ih je potrebno 1.500 da zamene foliju, i posle šest meseci korišćenja one su donele uštedu. Od 1. jula 2022. godine u sklopu digitalizacije Pošta Holandije zamenjuje pisano obaveštenje o prispeću pošiljke, kada primalac u vreme dostave nije kući, sms porukom ili e-mailom. Na taj način štedi vreme dostavljaču i 70.000 kg papira na godišnjem nivou pri čemu se povećava efikasnost i kvalitet usluge.

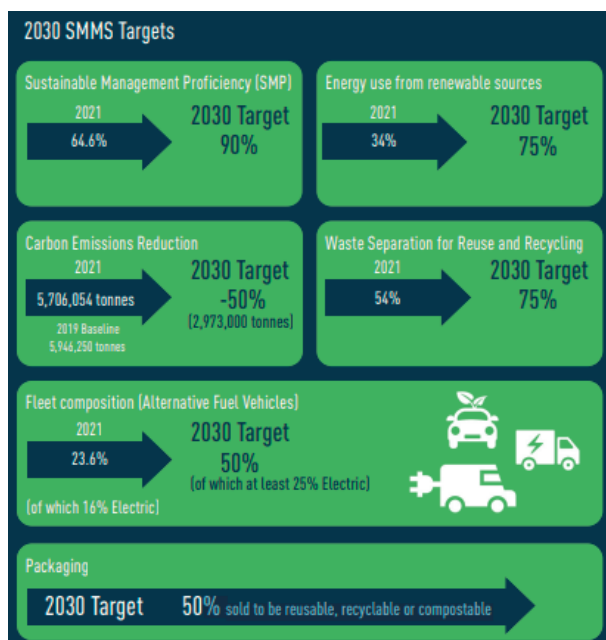
Poštanski operator Španije (*Correos y Telégrafos S.A.*) uvodeći uslugu „odgovorne dostave“ promovise smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte optimizujući rute isporuke. Ovaj operator u sastavu svoje flote poseduje preko 1.900 vozila na električni pogon, i više od 11.000 zaposlenih koji dostavu vrše peške. Hitne pošiljke

prave veće ekološke troškove. Usluga „odgovorne dostave“ smanjuje za 40% emisiju gasova sa efektom staklene bašte u poređenju sa hitnom isporukom, a košta kao standardni paket.

2.3. Doprinos Međunarodne poštanske korporacije

Međunarodna poštanska korporacija je udruženje koje je osnovano 1989. godine i čine ga 25 članica (poštanskih operatora) iz Azijsko-pacifičkog regiona, Evrope i Severne Amerike. Sedište je u Briselu, u Belgiji. Od početka svog rada postavila je standarde za poboljšanje kvaliteta i usluga, i razvila tehnološka rešenja koja su od koristi za sve članice udruženja širom sveta.

Treba naglasiti da je poštanski sektor jedan od retkih industrijskih sektora koji ima svoj program merenja održivosti i izveštavanja. Rezultati Programa održivosti poštanskog sektora (*The Postal Sector Sustainability programme*) objavljuju se svake godine počev od 2009. godine. A 2019. godine pokrenut je Održivi sistem merenja i upravljanja (*Sustainability Measurement and Management System - SMMS*) koji koriste poštanski operatori radi zaštite životne sredine i čiji ciljevi se zasnivaju na: održivom stručnom upravljanju, korišćenju energije iz obnovljivih izvora, smanjenju emisije ugljenika, upravljanju otpadom i njegovom odvajanju za reciklažu i ponovnu upotrebu, sastavu flote (vozila na alternativno gorivo), i pakovanju za ponovnu upotrebu ili reciklažu.



Slika 3. SMMS ciljevi Međunarodne poštanske korporacije do 2030. godine [4]

Ciljevi zasnovani na SMMS-u (Slika 3) predviđeni da se ostvare do 2030. godine u odnosu na baznu 2021. godinu su sledeći: održivo stručno upravljanje povećati sa 64,6% na 90%; korišćenje energije iz obnovljivih izvora povećati sa 34% na 75%; smanjenje emisije ugljenika sa 5.706.054 tona smanjiti za 50% na 2.973.000 tona; odvajanje otpada

za reciklažu i ponovnu upotrebu povećati sa 54% na 75%; sastav flote (vozila na alternativno gorivo) povećati sa 23,6% (od čega su električna vozila 16%) na 50% (od čega električna vozila povećati na 25%); i da pakovanje bude 50% za ponovnu upotrebu ili reciklažu.

Takođe, Međunarodna poštanska korporacija posluje i u skladu sa programom inicijative Naučno zasnovani ciljevi (*Science Based Targets initiative - SBTi*) u borbi protiv klimatskih promena i nastoji da smanji emisiju ugljenika po paketima i pismima za 20% do 2025. godine u odnosu na baznu 2013. godinu [4].

3. Doprinos reprezentativnih poštanskih operatora smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu

Doprinos reprezentativnih poštanskih operatora smanjenju uticaja klimatskih promena na životnu sredinu sagledaćemo kroz analizu dostupnih izveštaja poštanskih operatora: Nemačke (*Deutsche Post DHL Group*), Kanade (*Canada Post Corporation*) i Australije (*Australia Post*).

3.1. Doprinos poštanskog operatora Nemačke

Poštanski operator Nemačke (ili Pošta Nemačke) nastoji da svojom misijom i čistim operacijama u poslovanju postigne neto-nultu emisiju gasova do 2050. godine, u cilju zaštite klime. Zato investira 7 milijardi evra kako bi se smanjila emisija gasova sa efektom staklene bašte sa 39 miliona tona CO₂ na manje od 29 miliona tona CO₂ do 2030. godine, a što je u skladu sa Pariskim sporazumom (*Paris Agreement*) i inicijativom Naučno zasnovani ciljevi (*Science Based Targets initiative - SBTi*). Ovom investicijom će se: povećati upotreba održivih goriva za vazduhoplovstvo; dizajnirati sve nove zgrade tako da budu ugljenično neutralne; ponuditi sveobuhvatan portfolio zelenih proizvoda; elektrificirati 60% vozila za isporuku do poslednje milje, i do 2030. godine imaće više od 80.000 električnih vozila na putu [5].

Takođe, Pošta Nemačke je u skladu sa *SBTi* verifikovala svoje podciljeve u pravcu ograničavanja rasta globalnog zagrevanja na 1,5 stepeni Celzijusa, te nastoji da do 2030. godine smanji svoje direktne emisije od upotrebe goriva i indirektne od kupljene energije za 42% u odnosu na baznu 2021. godinu. Planira da efekat dekarbonizacije za 2023. godinu bude 1,3 miliona tona CO₂. Na isporuci je povećan broj električnih vozila sa 20.700 u 2021. godini na 27.800 u 2022. što je povećanje od 34%. Potrošnja energije sopstvene flote i zgrada je porasla u 2022. godini na 34.498 miliona kWh ili za 13,2% više nego u 2021. godini. Ali je povećan i udeo energije iz obnovljivih izvora u 2022. godini za 24,4% u odnosu na 2021. godinu. I planira da u 2027. godini u svoju vazдушnu flotu uključi i prve avione na električni pogon (*Alice*), jer je vazdušni transport energetski najintenzivniji vid transporta [6].

3.2. Doprinos poštanskog operatora Kanade

Poštanski operator Kanade (ili Pošta Kanade) je u svoju poslovnu strategiju ugradio Akcioni plan za zaštitu životne sredine (*Environmental Action Plan - EAP*), trogodišnji plan koji se sastoji od: klimatske akcije, nula otpada, održive isporuke i angažovanja zaposlenih.

Klimatska akcija je plan ispunjenja inicijative Naučno zasnovani ciljevi (*Science Based Targets initiative - SBTi*) odnosno podrazumeva smanjenje gasova sa efektom staklene bašte za 50% do 2030. godine u odnosu na baznu 2019. godinu, jer je Međunarodni panel za klimatske promene (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) u svom 6. izveštaju signalizirao „crveni kod za čovečanstvo“ i naglasio važnost ograničavanja rasta globalnog zagrevanja na 1,5 stepeni Celzijusa. Takođe, planira da do 2025. godine 67% dobavljača ima poslovanje u skladu sa *SBTi* i da do 2050. godine dostigne nultu emisiju ugljenika. Nastavlja da ulaže u obnovljive izvore energije: dekarbonizaciju flote od preko 14.300 vozila sa planom da do 2030. godine elektrifikuju flotu poslednje milje za 50%, a do 2040. godine dekarbonizaciju zgrada 100%; kako bi se smanjila emisija ugljenika; zamenu goriva (odnosno prelazak sa fosilnih goriva na struju); sisteme za automatizaciju zgrada, LED osvetljenje i ugradnju solarnih panela.

Nula otpada je plan smanjenja otpada, recikliranjem i njegovim ponovnim korišćenjem. Do 2030. godine cilj je nula otpada, dok je u 2022. godini za reciklažu išlo 67% ili 26.925 tona, a ostatak od 13.530 tona ili 33% na deponiju.

Održiva isporuka je plan zasnovan da se na poslednjoj milji koriste vozila bez emisije gasova sa efektom staklene bašte, kao i da se primenjuju tehnološka rešenja objedinjene isporuke.

Angažovanje zaposlenih je plan u cilju izgradnje kulture ekološke odgovornosti. Sprovode se projekti poboljšanja infrastrukture za reciklažu, prelazak sa proizvoda za jednokratnu na proizvode za višekratnu upotrebu, kao i prelazak na održive vidove transporta. Poštanski operator Kanade ulaže i u mala preduzeća koja su srce kanadske ekonomije. Na Dan planete Zemlje 2022. godine Pošta Kanade je posadila 68.000 stabala drveća za svakog zaposlenog po jedno, čime je izvršena sekvestracija 13.600 tona CO₂ [7].

3.3. Doprinos poštanskog operatora Australije

Poštanski operator Australije (ili Pošta Australije) preduzima sve mere u cilju zaštite životne sredine kroz: smanjenje emisije ugljenika; ulaganje u obnovljive izvore energije; povećavanje broja električnih vozila u voznom parku; smanjenje, ponovnu upotrebu i reciklažu održive ambalaže; sprovođenje principa cirkularne ekonomije u poslovanju; i transparentnost u lancu snabdevanja.

U svojoj Mapi puta održivosti 2025. poštanski operator Australije zadao je konkretne ekološke ciljeve (smanjenje emisije ugljenika i reciklažu otpada) koje pokušava da ostvari. Što se tiče ostvarenja prvog cilja: dekarbonizacija voznog parka (flote) zavisi od tehnoloških rešenja za prevozna sredstva i infrastrukturu za napajanjem alternativnim gorivom; dogovor sa dobavljačima (za drumski i vazdušni transport) je da i oni smanje svoje emisije ugljenika, jer one čine 70% ukupnog profila emisija; i za vazdušni saobraćaj smanjenje emisije gasova zavisi od usvajanja dugoročnih strategija za poboljšanje efikasnosti aviona i povećane upotrebe održivog avionskog goriva. I što se tiče ostvarenja drugog cilja: regulatorna politika može uticati na dostupnost i cenu reciklaže; prirodne katastrofe mogu povećati otpad na deponijama; smanjenje i reciklaža otpada zavisi od infrastrukture za reciklažu odnosno postrojenja za preradu otpada; i zavisi od tržišta otpada (kao robe za dalju prodaju), a samim tim i održivosti usluge prikupljanja otpada [8].

Pošta Australije nastoji da smanjenji emisiju gasova sa efektom staklene bašte do 2050. na nulu. Do 2025. godine želi smanjiti emisiju ugljenika za 15% u odnosu na baznu 2019. godinu. Izvor energije do 2025. u objektima i prostorima koji koristi biće 100% iz

obnovljivih izvora. Cilj je i da se otpad smanji za 20% u odnosu na 2019. godinu i da se poveća stopa recikliranja otpada na 70% do 2025. godine.

Treba istaći i da je od 2019. godine uručeno preko 200 miliona paketa sa nultom emisijom CO₂ što je ekvivalent uklanjanju 117.000 automobila sa puta ili smanjenja 280.000 tona emisije ugljenika kao deo programa *Carbon Neutral Deliveris*. Poštanski operator Australije pomaže i obnovu biodiverziteta u regeneraciji i zaštiti autohtone vegetacije kroz program *Bush regeneration*. Takođe, instalira solarne panele, LED osvetljenje i radi na boljoj energetskej efikasnosti objekata i prostora koje koristi za sopstvene potrebe [9].

4. Zaključak

Bez obzira, što se u domaćoj javnosti pridaje sve veći značaj smanjenju aktivnosti, kojima se negativno utiče na životnu sredinu, svedoci smo da je Republika Srbija jedna od ekološki najzagađenijih zemalja Evrope. Sve to dovodi do narušavanja zdravlja stanovništva, skraćuje se prosečan životni vek, ugrožava kvalitet života i vodi neravnomernom regionalnom razvoju. Pravna regulativa kojom se definiše zaštita životne sredine se ne poštuje u dovoljnoj meri, a nedostaje i adekvatna infrastruktura za reciklažu proizvoda.

Poštanski sektor je i u svetskim okvirima jedan od retkih industrijskih sektora koji ima svoj program merenja i izveštavanja o aktivnostima kojima se ispuštaju gasovi sa efektom staklene bašte u atmosferu, a životna sredina narušava putem nerekiciranog otpada. Poštanski operatori u globalu posmatrano svoje aktivnosti na smanjenju posledica klimatskih promena na životnu sredinu zasnivaju na: smanjenju emitovanja štetnih gasova time što vozni park elektrificiraju i tranzitiraju ka gorivu iz obnovljivih izvora koje ima nulu emisije, sprovođenju principa cirkularne ekonomije kojom se smanjuje i reciklira otpad i energetskej efikasnosti objekata i prostora uz upotrebu obnovljivih izvora energije.

Mere koje bi u Republici Srbiji trebalo preduzeti kako bi se smanjio negativan uticaj na životnu sredinu su: što skoriji ulazak u Evropsku Uniju; tržišna privreda sa uravnoteženim regionalnim ekonomskim razvojem; podsticaj inovacija i preduzetništva; ostvarivanje boljih veza između nauke i privrede; u razvoju se sve više oslanjati na informacione i komunikacione tehnologije sa naglaskom na digitalizaciji; edukacija stanovništva svih uzrasta o značaju i merama za očuvanje životne sredine; povećanje zaposlenosti i socijalne inkluzije; povratak mladih i obrazovanih stručnjaka u zemlju; raditi na boljem ugledu zemlje; obezbeđivati veći asortiman i kvalitet održivih usluga; racionalno korišćenje prirodnih resursa sa naglaskom na očuvanju životne sredine; smanjiti zagađenje i povećati reciklažu; ulagati u obnovljive izvore energije; ekonomsko razmišljanje zasnivati brinući i o budućim generacijama.

Literatura

- [1] Sustainable development (2023). *Universal Postal Union* [Online]. Available at: <https://www.upu.int/en/Universal-Postal-Union/Activities/Sustainable-Development>
- [2] Sustainability Vision November 2022 (2022). *PostEurop* [Online]. Available at: <https://www.posteurop.org/allThematicPublications>
- [3] 2022 Brochure of CSR Good Practices (2022). *PostEurop* [Online]. Available at: <https://www.posteurop.org/allThematicPublications>

- [4] IPC Service Catalogue 2022 (2022). *International Post Corporation* [Online]. Available at: <https://www.ipc.be/sector-data/reports-library/ipc-reports-brochures/service-catalogue-2022>
- [5] Environment (2023). *Deutsche Post DHL Group* [Online]. Available at: <https://www.dpdhl.com/en/sustainability/environment.html>
- [6] 2022 Annual Report (2022). *Deutsche Post DHL Group* [Online]. Available at: <https://www.dpdhl.com/en/sustainability/our-approach/sustainability-reports.html>
- [7] 2022 Sustainability Report (2022). *Canada Post Corporation* [Online]. Available at: <https://www.canadapost-postescanada.ca/cpc/doc/en/aboutus/2022-Sustainability-Report-E.pdf>
- [8] 2025 Sustainability Roadmap - External factors (2023). *Australia Post* [Online]. Available at: https://auspost.com.au/content/dam/auspost_corp/media/documents/australia-post-2025-sustainability-roadmap-risks-external-factors.pdf
- [9] Corporate Responsibility - Our Environment (2023). *Australia Post* [Online]. Available at: <https://auspost.com.au/about-us/corporate-responsibility/our-environment>

Abstract: *The impact of climate change on the environment is ubiquitous and permanent. The results of this research will present the role and extent of the postal sector in contributing to reducing the impact of climate change on the environment. The postal sector implements its actions in the direction of reducing the impact of climate change on the environment on the basis of the Sustainable Development Goals (SDGs), which were created by the Sustainable Development Agenda 2030 by the United Nations (UN). We will look at the contribution of the postal sector to reducing the impact of climate change on the environment through the analysis of the available reports of the Universal Postal Union (UPU), the Association of Public Postal Operators PostEurop (PostEurop), the International Postal Corporation (IPC), as well as representative postal operator, which in the future can also give the national postal operator (Public Enterprise Post of Serbia) a significant framework for assessing its future activities.*

Keywords: climate change, environment, postal sector, postal operator

**CONTRIBUTION OF THE POSTAL SECTOR TO REDUCING
THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE ENVIRONMENT**
Vladeta Petrović, Biljana Stojanović-Višić, Miodrag Simić, Biljana Janeva

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.003>

ANALIZA UTICAJA STRATEGIJA ALOKACIJE ODREDIŠTA I VELIČINE FLOTE AUTONOMNIH MOBILNIH SORTIRNIH ROBOTA NA PROIZVODNOST PRIMENOM SIMULACIONOG MODELA U FLEXSIM-U

Nenad Bjelić, Nemanja Golubović
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,
n.bjelic@sf.bg.ac.rs, n.golubovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Intenzivan tehnološki razvoj na poljima hardvera i softvera doveo je do pojave i sve intenzivnijeg korišćenja autonomnih mobilnih robota u realizaciji unutrašnjih robnih tokova. Postojanje efikasnih sortirnih sistema je preduslov za uspešnu distribuciju robe do krajnjeg korisnika, a ono je zasnovano na donošenju što je moguće boljih upravljačkih odluka. U tom smislu, u ovom istraživanju su analizirani rezultati funkcionisanja sortirnog sistema sa predefinisanim prostornim izgledom, baziranog na upotrebi autonomnih mobilnih robota. Posmatrano je funkcionisanje sistema u kombinacijama tri pravila alociranja odredišta na izlazne lokacije sistema, tri strukture odredišnih lokacija u toku i različite veličine flote robota. Sistem je modeliran primenom simulacionih modela razvijenih u softverskom paketu Flexsim, a analizom rezultata je stečen dublji uvid u očekivano ponašanje sistema pod posmatranim uslovima.*

Ključne reči: *autonomni mobilni roboti, simulacija, sortiranje, alokacija*

1. Uvod

Intenzivni tokovi robe sa sve kraćim vremenima isporuke i sve širim asortimanom su kao potrebu nametnuli korišćenje sortiranja kao aktivnosti koja, iako dodatna operacija koju je potrebno izvršiti nad robom, rezultuje efikasnom distribucijom proizvoda do krajnjeg korisnika. U skladišnim sistemima sortiranje omogućuje realizaciju zonskog komisioniranja koje podrazumeva manje kretanje komisionera između lokacija izuzimanja robe te i bržu selekciju robe. U industriji ekspres pošiljaka hub-and-spoke konfiguracija mreže, tj. iskorišćenje prednosti ekonomije obima u transportu od i ka hub-u ne bi bilo moguće bez postojanja efikasnog sortirnog sistema. Do skora, konvejni tip sortirnih sistema je bio jedina opcija i podrazumevao je primenu raznih kombinacija valjkastih i trakastih transportera, kliznica, pomoćnih sredstava za istovar sa sistema... Ovakvi sistemi se odlikuju velikim brzinama kretanja robe, ali i malom fleksibilnošću, kao i znatnom

površinom neophodnom za implementaciju. Iz tog razloga, svaka promena konfiguracije postojećeg sistema ili prilagođenje kapaciteta, zahteva znatna sredstva, resurse i vreme tokom kojeg nastaje prekid u funkcionisanju postojećeg sistema. Sa druge strane, intenzivan tehnološki razvoj u poslednjih 15-ak godina [1] na poljima hardvera (senzora, baterija [2], ...) i softvera, pre svega primene veštačke inteligencije u raznim segmentima funkcionisanja [3], doveo je do pojave i sve intenzivnijeg korišćenja autonomnih mobilnih robota - AMR (engl. Autonomous Mobile Robots). Usled svoje prilagodljivosti AMR-ovi su našli primenu u različitim aktivnostima iz oblasti rukovanja materijalima. Verovatno najpoznatije je korišćenje Kiva robota u okviru kompanije Amazon, koji se već desetak godina koriste za prinošenje komisioneru mobilnih polica sa robom kako bi odgovarajuća količina robe bila izuzeta i otpremljena kupcu. Drugi primer korišćenja ovakvih robota u roba-ka-čoveku sistemu komisioniranja je Autostore sistem koji u velikom broju vertikalnih skladišta robu u predefinisanim kontejnerima i u skladu sa porudžbinama vadi odgovarajuće kontejnere i prinosi ih komisionerima. Prednosti ovakvog načina skladištenja i rukovanja robom su doveli do toga da se jedan logistički provajder i iz Srbije odlučio za njega i uveo ga u svoje poslovanje pre par godina. Konačno, prednosti AMR-ova su dovele do toga da su našli svoje mesto i u oblasti sortiranja ekspres pošiljaka. Tako je na periferiji Istambula u prvoj polovini 2023. u rad pušten najveći sortirni sistem za pošiljke do 10kg zasnovan na AMR-ovima[4]. Kapacitet od oko 45000 pošiljaka na sat je obezbeđen radom 120 AMR-ova koji sa 5 ulaznih tačaka sortiraju robu na 700 izlaznih tačaka.

Iako predstavljaju novu opciju za realizaciju pretovarnih zadataka funkcionisanje ovakvih sistema podrazumeva donošenje odluka koje su, u svojoj prirodi, identične odlukama koje karakterišu i već postojeća tehnološka rešenja. Naime, pitanja kao što su koliko je potreban broj sredstava, koji pretovarni kapacitet je moguće ostvariti, kako alocirati robu po prostoru, koje algoritme rutiranja koristiti, u kojim tačkama slobodna vozila čekaju na zadatke, kako zonirati prostor itd., su sastavni deo projektovanja i upravljanja i sistemima zasnovanim na AMR-ovima. Naravno, u davanju odgovora na postavljena pitanja, tj. rešavanju adekvatnih problema u obzir je neophodno uzeti specifičnosti funkcionisanja svakog posmatranog sistema.

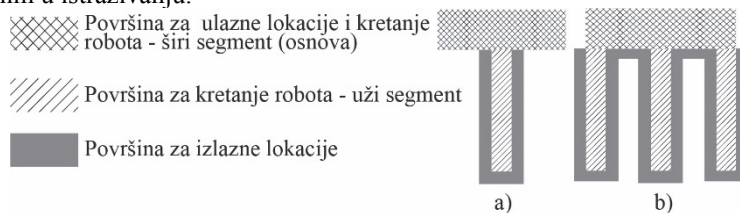
U tom smislu, cilj ovog rada je da se na konkretnom primeru layouta sortirnog sistema zasnovanog na AMR-ovima ispita uticaj kombinacije strategija alokacije odredišta na izlazne lokacije sistema, strukture odredišta u ulaznom potoku robe i broja raspoloživih AMR-ova na časovni kapacitet sistema. U tom cilju, rad je organizovan u 5 poglavlja. U drugom poglavlju je opisan posmatrani problem uz kraći pregled relevantne literature. U trećem je predstavljen simulacioni model. Svi detalji simulacionog eksperimenta, uključujući i najbitnije rezultate su dati u poglavlju četiri. Na kraju su data zaključna razmatranja i predstavljeni dalji planovi vezani za istraživanja na razmatranu temu.

2. Opis posmatranog problema

Proces sortiranja u sistemima sa AMR-ovima podrazumeva nezavisan rad svakog robota. U opštem slučaju svaki od AMR-ova prolazi kroz sledeće faze u radu: preuzimanje pošiljke na nekoj od utovarnih lokacija, transport jedinice robe do izlazne lokacije, istovar jedinice na izlaznoj lokaciji (u kontejner, džak, kutiju...) i konačno povratak na utovarnu lokaciju radi utovara nove jedinice tereta. Naravno, projektovanje i upravljanje ovakvim sistemima je izuzetno kompleksno jer podrazumeva čitav niz odluka, koje se donose na raznim hijerarhijskim nivoima i imaju različit nivo uticaja na efikasnost sortiranja. Neke

od njih su: način utovara (ručno ili primenom pomoćnih robota), definisanje broja i lokacija utovarnih lokacija, upravljanje dopunama baterija (broj lokacija za dopunu, lokacije, tehnologija dopune...), način definisanja putanja robota, regulacija blokada vozila, alokaciju odredišta po izlaznim lokacijama... U ovom istraživanju je cilj bio ispitivanje uticaja načina alokacije odredišta po izlaznim lokacijama, u zavisnosti od strukture odredišta robe za sortiranje, uz respektovanje veličine flote AMR-ova za predefinisani prostorni raspored (engl. Layout) prostora u kojem sortirni sistem funkcioniše.

U pogledu layout-a treba reći da je uzet široko rasprostranjen layout koji se odlikuje mogućnošću pozicioniranja velikog broja izlaznih lokacija, ali i smanjenim manevarskim prostorom za kretanje robota na pojedinim delovima. Konkretno, posmatrani tip layout-a je poznat kao T-layout usled svoje sličnosti sa simbolom slova „T“ (slika 1a). Operativni prostor se sastoji iz: šireg segmenta (osnove), u okviru kojeg se pozicioniraju ulazne lokacije i lokacije za punjenje baterija; i užih segmenata, normalno postavljenih u odnosu na osnovu, duž kojih su pozicionirane izlazne lokacije, a po kojem se kreću roboti radi istovara robe u odgovarajuću izlaznu lokaciju. U slučaju potrebe za povećanjem broja izlaznih lokacija moguće je postavljanje više paralelnih užih segmenata (slika 1b), koje može pratiti i povećanje površine osnove u cilju povezivanja svih užih delova. Minimalna širina užeg dela je dve širine staze za kretanje robota, kako bi se omogućilo njihovo mimoilaženje, ali se u praksi sreću i slučajevi sa tri širine staze kako bi se stvorio i dodatni prostor radi minimizovanja ometanja i blokiranja robota, što je i slučaj sa layout-om razmatranim u istraživanju.



Slika 1 Respektovani layout sortirnog sistema

Uzimajući u obzir smanjenu manevarsku sposobnost AMR-ova na užim segmentima jasno je da razmeštanje odredišta robe po izlaznim lokacijama, tj. alokacija odredišta, može imati znatan uticaj na ometanje i eventualno blokiranje AMR-ova. Treba naglasiti da se u radu pod ometanjem podrazumeva povećanje vremena kretanja AMR-a do izlazne lokacije, u odnosu na situaciju kada bi AMR sam radio u posmatranom sistemu, a koje nastaje usled prisustva drugih AMR-ova. Sa porastom broja AMR-ova intenzitet ometanja raste, kao i šansa da AMR dođe u stanje blokade, pod kojim se podrazumeva situacija u kojoj dva ili više AMR-a ne mogu da odrede putanju kretanja do izlazne lokacije usled okruženosti drugim robotima u narednim vremenskim periodima. U tom smislu, jasno je da alokacija odredišta po izlaznim lokacijama može imati uticaj na nivo ometanja i blokiranja. Na primer, ukoliko se u jednom užem segmentu lociraju u grupi odredišta sa većom frekvencijom istovara jasno je da dolazi do veće šanse za ometanje i blokiranje robota. Pored toga, ukoliko se frekventnija odredišta lociraju na delu užeg segmenta bližem osnovi, a manje frekventne lokacije dalje od osnove, ometanje robota koji robu nose u manje frekventna odredišta će takođe imati veliku verovatnoću ometanja i blokade. U tom smislu, uticaj alokacije na efikasnost realizacije sortiranja je razmatran kroz primenu tri strategije. U prvoj, u daljem tekstu referenciranu kao strategija „1“ raspored odredišta po

izlaznim lokacijama je definisan na slučajan način. U drugoj, referenciranoj kao strategija „2“, frekventnija odredišta su raspoređena bliže ulaznoj lokaciji, dok su u strategiji „3“ takva odredišta raspoređena što dalje od ulazne lokacije.

Kao što je već napomenuto, frekventnost pojave nekog odredišta je jedan od parametara koji može uticati na problem alokacije odredišta. Njega je naročito potrebno razmatrati jer je on poznat pre otpočinjanja procesa sortiranja u dovoljno dugom vremenskom periodu. Uticaj tog parametra je u ovom istraživanju respektovan analizom tri grupe rezultata, dobijenim u tri praktične situacije zasnovanom za Pareto principu. U prvoj situaciji je posmatran slučaj kada je broj istovara po odredištima ravnomerno raspoređen, odnosno kada je 80% jedinica tereta potrebno istovariti u 80% izlaznih lokacija. U drugom slučaju je 80% istovara potrebno realizovati u 50% izlaznih lokacija (odredišta), dok treći slučaj posmatra situaciju u kojoj nekoliko odredišnih lokacija dominira u tokovima tako da je posmatran slučaj kada je 80% istovara potrebno realizovati u 20% odredišta. U skladu sa procentom brojem odredišta u koje se istovara 80% jedinica robe slučajevi su referencirani oznakama „80“, „50“ i „20“.

Konačno, uticaj broja AMR-ova na nivo ometanja i blokiranja je očigledan. Međutim, iako je jasno da sa povećanjem broja funkcionalnih robota efikasnost sistema neće rasti linearno, usled sve većeg uticaja ometanja, bez detaljne analize funkcionisanja sistema sa različitim brojem robota ne može se ni definisati granični broj AMR-ova nakon kojeg dodavanje dodatnog robota u najboljem slučaju ne povećava kapacitet sistema. U tom smislu, u ovom radu je razmatrano funkcionisanje različitog broja AMR-ova u sistemu sa opisanim layout-om u situacijama primene tri strategije alokacije odredišta i tri mogućnosti učešća najfrekventnijih odredišta u ukupnom broju jedinica robe za sortiranje.

Korišćenje AMR-ova u sortirnim sistemima, kao uopšte i u drugim pretovarnim operacijama, je relativno nov koncept, stoga je sasvim očekivano da je broj modela koji se koriste za upravljanje sistemima sa AMR-ovima izuzetno mali. U [3] autori daju pregled upravljačkih problema za funkcionisanja sistema koji su bazirani na AMR-ovima i oni uključuju probleme vezane za dimenzionisanje veličine flote, rutiranje, vremensko angažovanje, zoniranje, dispečiranje itd. Sa druge strane, specifičnost svakog posmatranog sistema zahteva individualistički pristup upravljanju ovakvim sistemima. Iz tih razloga, jasno je da je u upravljanju ovakvim sistemima simulacija široko zastupljena. U pomenutom preglednom radu, autori navode da je u problemima definisanja nivoa decentralizacije u sistemima sa AMR-ovima, definisanja broja i tipova robota, zoniranja i upravljanja resursima, simulacija korišćena u 32 od 56 razmatranih radova.

3. Simulacioni model sortirnog sistema

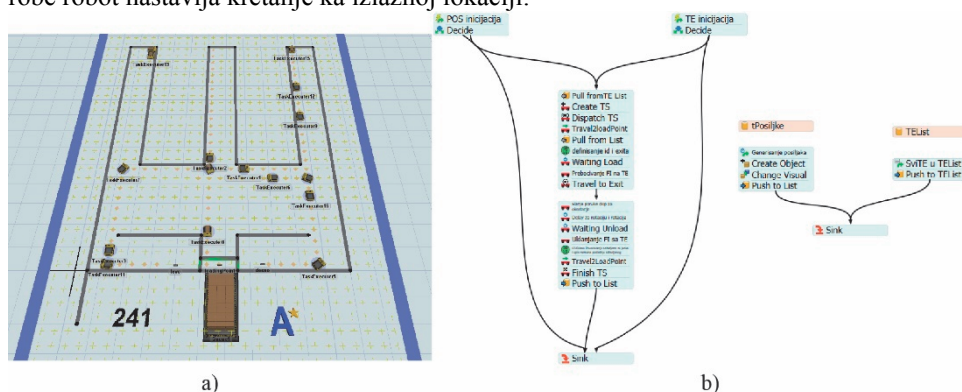
Broj jedinica tereta prenetih od ulaznih do izlaznih lokacija u toku sat vremena rada je parametar u kome je sublimiran uticaj svih respektovanih karakteristika sortirnog sistema. Iz tog razloga [3] navode ovaj parametar kao najčešće korišćen u studijama sa simulacijom kao pristupom za rešavanje problema. U skladu sa tim i u ovom istraživanju je ostvareni kapacitet posmatran kao osnovni pokazatelj efikasnosti rada sistema u različitim konfiguracijama ulaznih postavki.

Po svojoj prirodi rad sortirnih sistema spadaju u grupu procesa koji se ne mogu nastavljati u beskonačnost. Drugim rečima karakterišu se radom koji uvek kreće od istih početnih uslova i završava se sortiranjem poslednje jedinice tereta. U skladu sa iznetim, kao i sa napisanim u [5]–[7] jasno je da je analizu podatka o ponašanju ovakvog sistema

jedino moguće obaviti na podacima koji su rezultat višestrukog ponavljanja simulacionog eksperimenta sa različitim (slučajnim) skupovima jedinica robe, a opet u skladu sa odgovarajućom strategijom alokacije odredišta i učešćem svakog odredišta u ukupnom toku. Međutim, kako je potrebno da svaka realizacije eksperimenta bude apsolutno nezavisna od ostalih realizacija, tj. apsolutno slučajna, to je u realizaciji svakog eksperimenta potrebno predvideti postojanje perioda zagrevanja nakon koga će se AMR-ovi naći na slučajnim lokacijama koje odgovaraju realizaciji ulaznog toka jedinica robe, a nakon čijeg kraja će doći do anuliranja odrađenog posla.

Simulacioni model je razvijen u softverskom paketu Flexsim 2021 kombinovanom implementacijom 3D modela i ProcessFlow alata (slika 2). U praksi se ova kombinacija modeliranja pokazala kao vrlo efikasna jer omogućuje jednostavnu implementaciju logike modela kroz ProcessFlow alat, dok, sa druge strane, omogućuje jednostavniju validaciju modela uvidom u 3D model (slika 2a). Za prikaz jedinica tereta u 3D modelu su korišćeni FlowItem-i, a njihovo generisanje je kontrolisano primenom odgovarajuće liste i push i pull aktivnosti u ProcessFlow-u. Po kreiranju FlowItem-a u 3D objektu tipa Queue, koji je u neposrednoj blizini ulazne lokacije, tj. na sredini osnovnog dela „T“ layouta na strani suprotno od užih segmenata, aktivira se mehanizam za dodelu tereta AMR-u prema najdužoj raspoloživosti AMR-a za utovar. AMR-ovi su modelirani primenom TaskExecutor-a, tako što se po učitavanju modela generiše potreban broj AMR-ova i smešta naizmenično na lokacije koje su levo i desno od ulazne lokacije. Kako bi se izbegla situacija da jedinice tereta za sortiranje pristižu u toku čiji je intenzitet manji od sposobnosti flote robota da ih opsluže, intenzitet dolaska jedinica tereta je predimenzionisan. Na taj način vremenom dolazi do nagomilavanja tereta u redu, tako da je ostvareni kapacitet uvek posledica efikasnosti funkcionisanja sistema, a ne nedostatka jedinica tereta za sortiranje.

Nakon dodele zadatka prenosa pošiljke do odgovarajuće izlazne lokacije AMR se sa leve/desne lokacije kreće do ulazne lokacije gde se zadržava onoliko koliko je tehnološki predviđeno za operacije stavljanja robe na robot, skeniranja dokumenta itd. Nakon utovara robe robot nastavlja kretanje ka izlaznoj lokaciji.



Slika 2 3D i ProcessFlow delovi simulacionog modela

Implementacija željenog layout-a i karakteristika kretanja AMR-ova po užem segmentu (postojanje tri putanje) je realizovanom uključivanjem Flexsim-ovog 3D A* alata u kome se postavljanjem barijera lako definišu delovi površine po kojima se AMR-ovi

moгу kretati. Uz to, mreža po kojoj se kreću roboti je podeljena na segmente koji mogu sadržati samo po jedan AMR u jednom trenutku. Odabir niza segmenata po kojima će se kretati roboti na putu od ulazne do izlazne lokacije, tj. definisanje putanje je realizovano primenom široko implementiranog A* ruting algoritma ([1], [8], [9]), koji je sastavni deo istoimenog alata, a po kojem je alat i dobio ime. AMR-ovi se kreću po poljima ortogonalnim kretanjem uz rotacije od 90 stepeni na svakoj promeni pravca kretanja. Vreme okretanja robota je parametar koji se zadaje u implementiranom A* alatu..

Nakon stizanja do ciljane izlazne lokacije kretanjem po A* mreži segmenata, u zavisnosti od odnosa potrebnog i trenutnog usmerenja robota vrši se okretanje robota u željeni pravac i istovar jedinice tereta, tj. robot se na mestu izlazne lokacije zadržava koliko je to predviđeno tehnološki karakteristikama sistema. Nakon istovara i povećanja brojača odrađenih sortiranja, AMR se upućuje na lokaciju koja je levo ili desno od ulazne lokacije, pri čemu se upućivanje robota vrši naizmenično usled ravnomernog opterećenja strane dolaska robota na utovar. Pristizanjem na tu lokaciju AMR-ovi postaju raspoloživi za novi utovar. Sistemom barijera oko ulazne lokacije je omogućeno da je uvek samo po jedan AMR sa svake strane raspoloživ za utovar jer dok ne bude angažovan za utovar on svojim stajanjem na segmentu u kojem je leva/desna lokacija blokira druge da priđu toj lokaciji i time završe svoj aktivni zadatak.

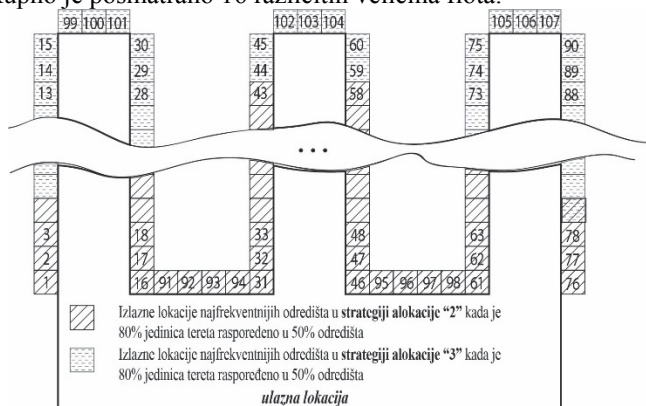
Ponašanje AMR-ova, u smislu redosleda realizacije operacija je realizovano primenom koncepta TaskSequence-i, prikazanom na slici 2b. Pri čemu treba naglasiti da su svi ulazni parametri o postavkama sistema i svih njegovih elemenata definisani primenom odgovarajućih tabela.

4. Postavke simulacionih eksperimenata i dobijeni rezultati

Koncept simulacionog modela, opisan u prethodnom poglavlju je primenjen na konkretnom primeru sortirnog sistema sa sledećim karakteristikama:

- Osnovni segment layout-a je širok 10.5m i dugačak 5m. Duž šireg dela osnovnog segmenta su na ravnomernom rastojanju smeštena tri uža segmenta dužina 7.5m i širine 1.5m.
- Za sortiranje se koriste AMR-ovi dimenzija 0.48m x 0.38m x 0.2m, a u skladu sa tim su dimenzije segmenata za kretanje robota, korišćenih i u realizaciji A* ruting algoritma, 0.5m x 0.5m, što je i veličina predviđena za površinu svake izlazne lokacije.
- Na osnovu dimenzija izlaznih lokacija i layout-a sistema omogućeno je pozicioniranje 107 izlaznih lokacija čije pozicije i šema indeksiranja su prikazane na slici 3. Pored toga, na istoj slici je prikazan način alokacije najfrekventnijih odredišta za slučaj strategija „2“ i „3“ u situaciji kada je 80% jedinica robe raspoređeno među 50% odredišta. Usled nepranog broja izlaznih lokacija, lokacija 79 se dodeljuje frekventnijim odredištima u obe strategije.
- Brzina kretanja robota je 3 m/s
- Ubrzanje je takvo da se, zbog elektro motora koji pogone robote, može smatrati da nema gubitaka usled ubrzanja i usporenja
- Brzina rotacije AMR-ova je 180 °/s
- Roboti obavljaju isključivo ortogonalno kretanje i pri svakoj promeni pravca se zaustavljaju radi rotacije za 90 °
- Vreme za utovar (uključujući i skeniranje, tj. identifikaciju odredišta) je 0.5s

- Vreme istovara tiltovanjem je 1.5s i istovar je jedino moguć na desnu stranu robota, što znači da dolazak robota kome određena lokacija nije sa desne strane podrazumeva okretanje robota za potrebiti ugao, odnosno proporcionalno povećanje vremena istovara.
- Posmatrano je postojanje samo jedne ulazne stanice locirane duž šire ivice osnovnog segmenta suprotno od užih segmenata sistema, kao na slici 3.
- Broj AMR-ova u floti je variran od 10 do 40, sa korakom povećanja od 2 robota, tj. ukupno je posmatrano 16 različitih veličina flota.



Slika 3 Numerisanje izlaznih lokacija i primer njihove alokacije odredištima

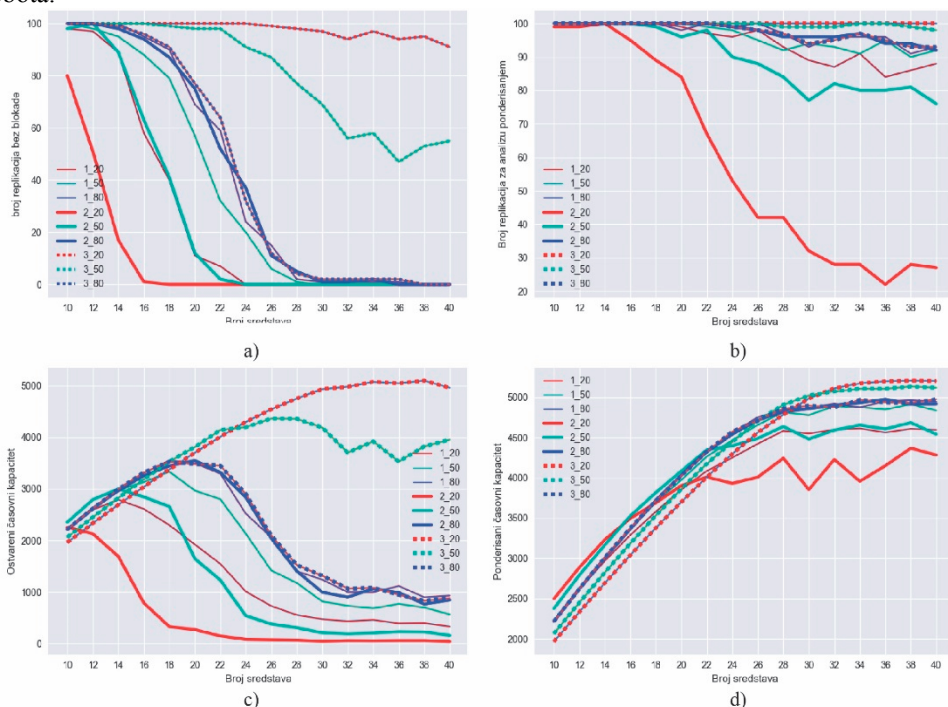
Testnim puštanjem modela je definisano da primena perioda zagrevanja u trajanju od 1h rada dovodi do sigurnog angažovanja svih AMR-ova u sortiranju, odnosno da su u tom trenutku pozicije AMR-ova posledica slučajnosti izazvane odredištima jedinica koje AMR-ovi sortiraju do tog trenutka, a koja su slučajna u svakoj realizaciji eksperimenta.

Radi što veće pouzdanosti dobijenih rezultata za svaku od 144 kombinacije ulaznih podešavanja sistema (veličine flote AMR-ova, strategije alokacije i učešća odredišta u toku) realizovano je 100 replikacija eksperimenta. Pored podataka o broju realizovanih istovara nakon perioda zagrevanja (slika 4c), a sa ciljem detaljnije analize ponašanja sistema, prikupljani su i podaci o broju replikacija eksperimenata u kome se nije pojavila blokada rada nekog od AMR-ova, prikazani na slici 4a.

U Flexsim-u pojava blokade nekog AMR-a znači i prestanak rada modela, odnosno kao broj realizovanih istovara se na kraju dobija broj istovara do trenutka blokade. Kako takvi podaci ne obezbeđuju realan uvid u efikasnost rada sistema, usled različitih dužina perioda rada, to je, radi realnijeg poređenja sistema, uveden pojam ponderisanog časovnog kapaciteta sistema. On u suštini, predstavlja kapacitet sistema ostvarenog do trenutka blokade preslikan na 1h rada sistema. Međutim, kako bi krajnje veličine bile u realnim granicama u obzir su uzimane samo one replikacije u kojima je sistem radio duže od neke granične vrednosti. U ovom radu je za graničnu vrednost uzeto minimalno vreme rada od 70s nakon perioda zagrevanja, a broj replikacija koja su ušla u proračun ponderisanog kapaciteta je prikazan na slici 4b. Vrednosti rezultujućeg ponderisanog kapaciteta su prikazane na slici 4d.

Iz rezultata simulacije prikazanih na graficima na slici 4 može se jasno primetiti intenzivno prisustvo blokada u realizaciji eksperimenata, odnosno neadekvatnost primene A* ruting algoritma integrisanog u Flexsim radu AMR-ova u posmatranom layout-u.

Međutim, bez obzira na znatno prisustvo blokada, iz rezultata se takođe može zaključiti da je strategija alokacije „3“, tj. ona u kojoj se najfrekventnija odredišta lociraju na izlazne lokacije najudaljenije od ulazne lokacije, pokazala najveću otpornost na pojavu blokada. Drugim rečima, duže vreme realizacije sortiranja svakog AMR-a je nadomešteno manjim čekanjem na završetak istovara drugih robota duž dugih segmenata. Ova tvrdnja važi ne samo za broj replikacija eksperimenta bez blokada (slika 4a), već i za trenutke pojave blokade, odnosno broj replikacija u kojima se blokada javila nakon 70 sekundi rada u stacionarnom režimu jer se na slici 4b jasno vidi da strategija alokacije „3“, za sve varijante učešća (linije „3_20“, „3_50“ i „3_80“ na grafiku) imaju najmanje replikacija sa blokadom pre granične vrednosti. Drugim rečima, strategija alokacije „3“ se pokazala kao dominantna u odnosu na druge dve strategije u svim kombinacijama veličine flote i učešća frekventnih odredišta. Sa druge strane, u situacijama postojanja malog broja dominantnih odredišta kao apsolutno inferiorna strategija alokacije, bez obzira na veličinu flote, pokazala se strategija u kojoj se odredišta alociraju izlaznim lokacijama najbližim ulaznoj lokaciji. Razlog za to je velika verovatnoća prisustva većeg broja AMR-ova na malom broju lokacija na početku užeg segmenta layout-a, što neminovno vodi blokadi nekog robota.



Slika 4 Rezultati simulacionih eksperimenata

Po pitanju uticaja veličine flote na proizvodnost sistema sa grafika na slici 4d, na kome je isključen uticaj blokade robota, se jasno vidi da povećanje flote utiče na povećanje časovnog kapaciteta do broja od cca. 36 vozila. Međutim, treba imati u vidu da je na tom grafiku pokazan ponderisani kapacitet, tj. kapacitet bez uticaja blokada. Tako da se uzimanjem u obzir i uticaja blokada na kapacitet, tj. respektovanjem stvarno realizovanog

kapaciteta (slika 4c) jasno uočava da se sa povećanjem flote iznad 30 robota dolazi i do znatnog povećanja broja blokada, tj. do ostvarenja identičnog kapaciteta manjim flotama, ili pak do njegove redukcije.

5. Zaključna razmatranja

Sortirni sistemi bazirani na primeni AMR-ova, usled prednosti vezanih za jednostavnost uvođenja/isključenja robota, brzinu realizacije projekta i redukovane prostorne zahteve predstavljaju veoma perspektivnu alternativu trenutno tržišno dominantnijim konverejskim sortirnim sistemima. Obzirom da se radi o novoj tehnologiji koja do skora nije bila predmet naučnog interesovanja, u smislu rešavanja tipičnih upravljačkih problema, to je jasno da je razvoj praktično primenljivih modela i pristupa njihovom rešavanju tek na početku. Ovo je još više izraženo činjenicom da se upravljanje svakim sistemom mora posmatrati u duhu specifičnosti kojima se konkretni sistem karakteriše. U tom smislu, u ovom istraživanju je cilj bio analiza upravljačkih odluka vezanih za primenu strategije alokacije i veličinu flote AMR-ova kojom se dostiže maksimalni časovni kapacitet sistema. Kao alat za modelovanje je korišćena simulacija, konkretno u softverskom paketu Flexsim 2021, i mora se priznati da je simulacija potvrdila svoju univerzalnost i u primeni za analizu ovih sistema. Ono što ipak treba naglasiti je da se A* rutin algoritam, integrisan u sam simulacioni softver pokazao kao nedovoljno praktičan za rutiranje AMR-ova jer se ispostavilo da nedovoljno efikasno rešava situacije ometanja u kojima nekom od robota preči blokada. Naravno, implementacija algoritma za planiranje ruta iz realnih sistema bi bila najbolje moguće rešenje za prevazilaženje ovog problema. Međutim kako su ti algoritmi poslovna tajna, kao prvi sledeći korak u istraživanju vezanim za upravljanje posmatranim sistemima autori planiraju implementaciju nekog drugog često korišćenog algoritma za definisanje ruta kretanja robota, pre svega D* i D* light algoritma.

Po pitanju strategije alociranja odredišta u posmatranom sistemu se kao dominantno pokazalo alociranje frekventnijih odredišta po krajevima užih segmenata. Međutim, u cilju sveobuhvatne analize pravila alociranja potrebno je ispitati mogućnost naizmeničnog lociranja visoko i nisko frekventnih odredišta duž užih segmenata. Ovakav pristup spada u probleme kombinatorne optimizacije i njegova implementacija podrazumeva primenu nekog optimizacionog modela za rešavanje takvih problema, ali i unapred poznatu strukturu robe po odredištima na osnovu koje se definiše raspored odredišta po izlaznim lokacijama, tako da se minimizuje broj frekventnih odredišta koja su bliska jedna drugima i time utiču na povećano ometanje robota u njihovoj blizini.

Konačno, još jedan pravac mogućeg istraživanja posmatranog problema je utvrđivanje performansi sortirnog sistema za slučaj kada postoji više ulaznih stanica. Takva struktura ulaza robe u sistem bi mogla da utiče na povećanje kapaciteta sistema, ali ujedno otvara i nove upravljačke probleme, kao što je definisanje ulazne stanice na koju se AMR upućuje nakon istovara, te je svaki takav sistem potrebno modelirati i utvrditi njegovu ponašanje pod datim uslovima funkcionisanja.

Literatura

- [1] R. Siegwart, I. Reza Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, Introduction to Autonomous Mobile Robots. The MIT Press, 2011.

- [2] D. McNulty, A. Hennessy, M. Li, E. Armstrong, and K. M. Ryan, "A review of Li-ion batteries for autonomous mobile robots: Perspectives and outlook for the future," *Journal of Power Sources*, vol. 545, p. 231943, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.231943.
- [3] G. Fragapane, R. de Koster, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, "Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda," *European Journal of Operational Research*, vol. 294, no. 2, pp. 405–426, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2021.01.019.
- [4] Europe's Biggest Robotic Parcel Sorting System Goes Live. Accessed: Jun. 10, 2023. [Online]. Available: <https://fmindustry.com/2023/04/06/europes-biggest-robotic-parcel-sorting-system-goes-live/>
- [5] M. Marklund and J. Laguna, *Business Process Modeling, Simulation and Design*, 3rd Ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018. doi: 10.1201/9781315162119.
- [6] D. Kelton, R. Sadowski, and N. Zupick, *Simulation with Arena*, 6th Ed. NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [7] J. Banks, J. Carson, B. Nelson, and D. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 5th Ed. Pearson Education Limited, 2014.
- [8] M. De Ryck, M. Versteyhe, and F. Debrouwere, "Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 54, pp. 152–173, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.12.002.
- [9] C. Mahulea, M. Kloetzer, and R. Gonzalez, *Path Planning of Cooperative Mobile Robots Using Discrete Event Models*, 1st edition. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2019.

Abstract: *The intensive technological development of hardware and software has led to a significant increase of use of autonomous mobile robots in internal goods flows. An efficient sorting system is a prerequisite for successful distribution of goods and it must be based on the best possible control decisions. In that sense, this research analyzed the operation of a sorting system with a predefined layout, based on the use of autonomous mobile robots. We considered the operation of the system under three rules for allocating goods' destinations to the output locations, three structures of goods' destinations in input flow, and different fleet sizes. The system was modeled using simulation models developed in the Flexsim software, and the analysis of the results provided a deeper insight into the expected behavior of the considered system.*

Keywords: *autonomous mobile robots, simulation, sorting systems, allocation*

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ALLOCATION STRATEGIES AND AUTONOMOUS MOBILE SORTING ROBOT FLEET SIZE ON SYSTEM PRODUCTIVITY BY FLEXSIM'S SIMULATION MODEL

Nenad Bjelić, Nemanja Golubović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.004>

TOWARDS A PHYSICAL INTERNET: THE IMPACT ON CEP SERVICES IN SERBIA

Miloš Milenković, Nikola Knežević, Nebojša Bojović

University of Belgrade – The Faculty of Transport and Traffic Engineering, Belgrade,
Serbia, m.milenkovic@sf.bg.ac.rs, n.knezevic@sf.bg.ac.rs, nb.bojovic@sf.bg.ac.rs

Abstract: *The courier, express, and parcel (CEP) market is known for being one of the most competitive. However, the way parcels are currently transported, transshipped, stored, and distributed is not economically, ecologically, and socially sustainable. This paper introduces the concept of the Physical Internet (PI) as one of the most ambitious approaches to enhance efficiency and sustainability in transport. Focusing on the national market, the paper describes how PI can be applied to CEP delivery services. It explores the potential benefits as well as the challenges in implementation and discusses strategies for overcoming these barriers.*

Ključne reči: *courier, express, parcel, delivery, physical internet*

1. Introduction

The courier, express and parcel (CEP) sector refers to the transportation and delivery services for packages and parcels. It has been greatly influenced by e-commerce in recent years. The exponential growth rate of e-commerce, additionally accelerated by the COVID-19 pandemic, has contributed to a significant growth to the volume of shipments in the CEP segment. In the EU countries, the number of package shipments in the period from 2017 to 2021 grew at an annual rate of about 14.6%. In the same period, courier and express services grew at a rate of about 18% per year, that is, the total volume of these shipments increased by about 91% in five years. Also, there was an increase in the volume of postal shipments weighing less than 2 kg that contain goods, by about 33% per year, or about 215% in the same period. A significant increase in the volume of shipments in this segment has also been recorded in Serbia due to the factors such as rising disposable incomes, urbanization and the growing middle class. Despite the fluctuations experienced during the COVID-19 pandemic, the parcel shipments achieved an annual growth rate of approximately 6%. At one point during this period, it even reached a peak volume of around 1.1 million shipments per year. On the other hand, courier and express shipments have recorded a constant growth of about 12.1% annually since 2017, i.e. in the period from 2017 to 2021. The total volume of these shipments increased by about 58%. In 2022,

around 51.2 million parcels were delivered in the courier, express and parcel (CEP) market in Serbia (Statista, 2023).

This positive trend in CEP segment will be continued in foreseeable future due to the intensive expansion of e-commerce, technological development and shift in consumer preferences towards convenient and efficient delivery services. However, this intensive growth of CEP market implies some challenges both for logistics service providers as well as for the society. Since the CEP market represents the first/final leg of supply chain management that includes urban logistics, the presence of delivery vans in urban areas has a detrimental effect on urban traffic. For CEP delivery companies this leads to increased amount of transportation activities and the higher delivery cost as well as the quality of service provision. Presence of inadequate infrastructure also limits logistics and delivery capabilities. Community is faced with social, environmental and economic consequences mostly in the form of traffic congestion, noise, pollution as well as increased risk of traffic accidents. An additional problem, which exacerbates the aforementioned issue of congestion, is that at the moment, each service provider offers CEP delivery services as a separate competitor. While this is economically advantageous for customers, it comes at a significant cost to society and the city (Bartucz et al., 2023). Currently, the most commonly used vehicle size by CEP service providers in Serbia is light diesel vans with a total permissible weight of 3 to 4 tones. According to insights from one courier company, the utilization of these trucks is low, at around 60%, resulting in a significant number of kilometers driven either empty or with a very low payload. Each courier company operates its regional centers in different parts of the country. However, these hubs currently provide sorting and consolidation functions exclusively for the owning company, and their storage and processing capacity greatly exceeds the actual workload. All of these issues, in conjunction with the increased demand for CEP delivery, lead to economic, ecological, and environmental sustainability concerns.

An approach to address the above mentioned problems is to develop a solution based on the idea of moving the digital packets over the Internet. The concept of Physical Internet (PI or π) proposed for the first time by The Economist in 2006 (Rusich, 2017) and further developed by Montreuil (Montreuil, 2011; Montreuil, 2012) may sound like a theoretical model, however the technology is already available and potential barriers are purely economic, social or political not technical (Milenkovic, 2022). PI represents a relatively new logistics and supply chain management concept designed on top of different technologies such as Internet of Things (IoT) with the aim to contribute to a radical improvement of economical, ecological and social efficiency and sustainability of shipment transport, storage, distribution and use (Treiblmaier, 2020). The main purpose of the PI is to universally interconnect logistics networks through world-standard modular containers, interfaces and protocols in order to improve the worldwide efficiency and sustainability of logistics (Montreuil et al., 2012). Interconnection and synchronization of logistics networks will result in a creation of a collaborative physical network of networks which will be capable to autonomously optimize the shipment of encapsulated goods of various sizes and types by means of routing protocols, tracking mechanisms and interoperability standards (Marino et al., 2019). In general, as well as in the context of CEP delivery services, introduction and operationalization of PI may lead to numerous positive effects such as increased efficiency and flexibility, improved sustainability, lower operational costs and improved customer satisfaction. However, shift to PI requires overcoming a number of issues. Some of the most important are the lack of standardization,

misalignment of infrastructure capacities, lack of trust and collaboration between the actors in supply chain and legal and data sharing constraints. The aim of this paper is to analyze the actual process of CEP services in Serbia, describe potential weaknesses of existing system of parcels distribution and propose improvements based on the PI paradigm.

The paper is organized as follows. The second section gives the detailed overview of the PI concept and its main components. Third section is dedicated to an analysis of existing CEP services in Serbia and identification of gaps towards shifting to PI-based parcel distribution proces. Concluding remarks are given in the fourth section.

2. Physical Internet

Physical internet is defined as an open, global and multimodal logistics system founded on universal physical, digital and operational interconnectivity and enabled through standard encapsulation, protocols and interfaces (Montreuil, 2011). Therefore, the main purpose of the Physical Internet is to universally interconnect logistics networks through world-standard modular containers, interfaces and protocols in order to improve the worldwide efficiency and sustainability of logistics (Montreuil et al., 2012). Interconnection and synchronization of logistics networks will result in a creation of a collaborative physical network of networks which will be capable to autonomously optimize the shipment of encapsulated goods of various sizes and types by means of routing protocols, tracking mechanisms and interoperability standards (Marino et al., 2019). The design and operationalization of the Physical Internet is based on Digital Internet as an already widely accepted service technology. The Digital Internet connects billions of devices all over the world and allows every device to communicate with all others. The users of Digital Internet are private, commercial or governmental entities equipped with computers or smart phones. The users insert flows into the Digital Internet in the form of digital data, which is sealed in data packets and transmitted via a network of communication links. The data flows are embedded in data packets. The data within a packet is encapsulated and is not dealt with by Internet. The packet header contains all information required for identification of the packet and its proper routing to the destination. The data packets are directed via routers, carried over the links through physical media such as optical cables and switched between different physical media via modems (Dong and Franklin, 2018). The internet services are operated by various Internet Service Providers (ISPs) which ensure smooth flows of all kind of digital information. In Digital Internet, internet protocols have been introduced to standardize and organize its operationalization. A protocol defines the format of the packets of digital information exchanged between peers in the Digital Internet, how hosts should be addressed as well as the actions taken in the transmission of the packets across the Digital Internet. The design of the Digital Internet and its protocols provide users with a “connection-free” service: they can simply use the Digital Internet without a need to understand how their data will be routed from its origin to destination point.

The design and operationalization of the Physical Internet is based on Digital Internet as an already widely accepted service technology. The Digital Internet connects billions of devices all over the world and allows every device to communicate with all others. The users of Digital Internet are private, commercial or governmental entities equipped with computers or smart phones. The users insert flows into the Digital Internet in the form of digital data, which is sealed in data packets and transmitted via a network of

communication links. The data flows are embedded in data packets. The data within a packet is encapsulated and is not dealt with by Internet. The packet header contains all information required for identification of the packet and its proper routing to the destination. The data packets are directed via routers, carried over the links through physical media such as optical cables and switched between different physical media via modems (Dong and Franklin, 2018). The internet services are operated by various Internet Service Providers (ISPs) which ensure smooth flows of all kind of digital information. In Digital Internet, internet protocols have been introduced to standardize and organize its operationalization. A protocol defines the format of the packets of digital information exchanged between peers in the Digital Internet, how hosts should be addressed as well as the actions taken in the transmission of the packets across the Digital Internet. The design of the Digital Internet and its protocols provide users with a “connection-free” service: they can simply use the Digital Internet without a need to understand how their data will be routed from its origin to destination point.

In the Physical Internet, the users can be commercial and private shippers. The flows they insert in the Physical Internet consist of various physical objects (groceries, consumer goods, etc.) packed into standardized packages known as π -containers and then transported in a network of physical corridors. Mixing/distribution centers navigate the π -container flows in the network, transportation modes carry the π -container flows whereas intermodal terminals allow cargo to switch between different transport modes. The Physical Internet services will be operated by various Logistics Service Providers (LSPs) which secure smooth deliveries of all types of physical objects. Shipments delivery is also characterized by protocol-like international agreements to standardize the flows, securing that cargo from different origins around the world can be delivered. The implementation of a similar “connection-free” service is considered in the design of Physical Internet: a user of Physical Internet trusts the Physical Internet and its services to ship their goods to any destination without knowing about the route that the goods take (Dong and Franklin, 2018). The concept of Physical Internet is illustrated on Figure 1.

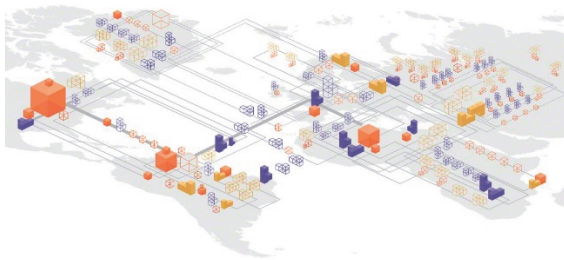


Figure 1. Concept of Physical Internet (Milenkovic, 2022)

The establishment of global logistics standardization is essential for a continuous growth in international trade and the increase in transport demand. World logistics largely uses 20 and 40 feet container shipments (90% of the world containers are 20 and 40 feet containers). For this reason, major international hubs provide specialized terminals for

handling and transshipment of containers from one mode to another. Packaging standardization is also implemented by DHL, FedEx, UPS and other LSPs in the last mile delivery. The Physical Internet generalizes and significantly extends the notion of standardization.

As it is mentioned above, the Physical Internet will not deal with freight. Pallets will no longer exist. Physical Internet will only deal with packages of goods, equivalently to ports that deal only with containers. These packages, hereafter termed π -containers (π symbol corresponds to the Greek letter PI, which corresponds to the two-letter abbreviation for the Physical Internet) so as to differentiate them from current containers, will be of standard size (just like existing 20- and 40-foot containers), environmentally sustainable (built from eco-friendly materials), smart (trackable/routable by RFID and GPS), secure (π -containers will be sealable for security in the same way as a shipping container is sealed today) and modular (Figure 2.).

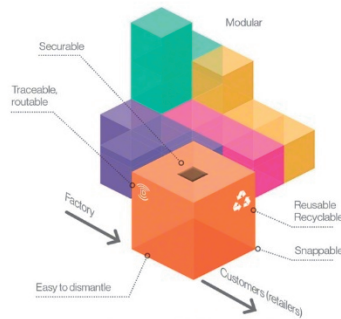


Figure 2. Characteristics of π -containers (Milenkovic, 2022)

Universal connectivity represents one of the most important features of the Physical Internet (Hofman et al, 2017). From a logistics perspective, universal connectivity refers to easing the movement of physical objects or shipments, from one component to another, their storage or treatment within any of its capable constituents as well as responsibility sharing and contracting between actors. Universal connectivity enables a high degree of cooperation on various levels and between various actors.

Universal connectivity should be achieved through physical, digital and operational interconnectivity (Montreuil et al, 2012):

- Physical interconnectivity secures that physical entity (shipment) can flow seamlessly through the PI. In order to achieve this, physical objects are encapsulated in standard modular PI containers or π -containers.
- Digital interconnectivity ensures that physical entities, constituents and actors can seamlessly exchange meaningful information across the Physical Internet. This includes tracking of objects within the Physical Internet, message exchange among the objects and human actors enabled by the Internet of Things.
- Operational interconnectivity ensures that in-the-field operational processes as well as the business processes are seamlessly interconnected so that it is easy and

efficient for users to exploit PI for fulfilling their logistics needs and for PI constituents to seamlessly collaborate in serving the logistics users of PI users.

In the PI, π -containers will be moved by π -movers. The main types of π -movers are (Montreuil et al., 2010):

- π -transporters which include π -vehicles and π -carriers, respectively vehicles (trains, trucks, ships) and carriers (wagons, trailers) specially designed for easy, secure and efficient moving of π -containers. The main difference between π -vehicles and π -carriers is that the first are self-propelled whereas the second have to be pushed or pulled by π -vehicles or π -handlers;
- π -conveyors are specialized in continuous flowing of π -containers along determined paths without using π -vehicles and π -carriers. π -conveyors may differ from contemporary conveyors by not having rollers nor belts (Figure 3.);

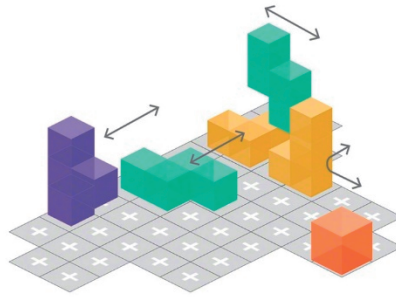


Figure 3. π -conveyors (Milenkovic, 2022)

In the Physical Internet there will be only π -container material handling and storage systems empowered by innovative technologies and processes which enable the following functional capabilities (Montreuil, 2011):

- Enabling fast and reliable input and output performance;
- Providing a seamless interface with vehicles and systems moving products in and out, as well as with client software systems for tracking and interfacing with the π -containers;
- Monitoring and protecting the integrity of π -containers;
- Securing the π -containers on the desired level.

π -container material handling and storage will be conducted in π -nodes. π -containers will be stacked in π -node like the containers are stacked in the ports, there will not be a need for storage racks since the pallets are eliminated from the system. In other words, π -nodes are locations in which the operations with π -container such as receiving, routing, handling, storing, folding, composing, decomposing and others, are performed (Montreuil et al., 2010). There are different π -nodes with different scope of services from the simple transfer of π -carriers between π -vehicles to complex multimodal multiplexing of π -containers. Activities at a π -node may affect physical changes such as switching from a transportation mode to another. π -nodes are publicly rated based on some key performance indicators such as speed, service, handled dimensions of π -containers, capacity and others. This

information will be used by the clients during the decision making process as well as by the other Physical Internet actors for routing purposes.

In current freight transportation there are two distinct ways that freight is transported. Direct service or point-to-point service is established between an origin-destination pair in case when there is enough volume of freight to justify dispatching of a truck (full truckload), train or a ship. In Physical Internet a distributed multi-segment intermodal transport will be the preferred way of moving freight from origin to destination. The distributed multi-segment travel includes movement of π -containers by different carriers and/or modes taking charge of inter-node segments with π -nodes which will enable seamless transfer of π -containers and/or carriers between segments (Figure 4.). More precisely, the delivery process will look like a relay race (Trebilcock, 2012). Each π -transporter will carry a load up to the next transit hub, then he will pick up a backhaul and return home within its work shift time. There, another transporter (the same or other mode of transport) would pick up the load within a short time interval and move it until the next transit hub. It is expected that by this distributed multi-segment process the delivery time could be significantly shortened.

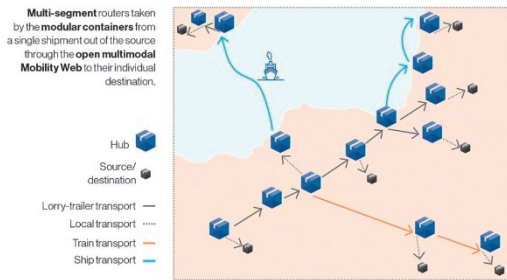


Figure 4. Enabling an open global mobility web (Milenkovic, 2022)

Various levels of decision making centralization and autonomy are possible in distributed multi-segment travel (Montreuil, 2011):

- Low level: π -container does not have any decision making capability. Shippers or LSPs are planning complete routes prior to departure. They may impose also a set of key intermediary nodes and or links and the rest can be left to more autonomous decision-making.
- Medium level: π -container has a minimum decision making autonomy. Human or virtual logistic agent takes decisions instead of a π -container, and transmits it to it and to other Physical Internet elements involved in the route.
- High level: π -container has a maximum decision making autonomy. Shippers specify only desired dispatching time and final destinations of the π -containers and maximum budget allowed. π -containers decide on their routing dynamically, adopting their plans instantaneously based on the latest information received due to their smart and connected nature.

In existing logistics system, warehouses and distribution centers (DCs) are used by a limited number of actors, in some cases only by one actor. Physical Internet enables

transition from private supply chains to global, open supply Web with the following main characteristics (Montreuil, 2011):

- The nodes (distribution centers, warehouses and others) are fully accessible to most actors (manufacturers, distributors, LSPs, retailers or users). That means that a DC will be open to receive or crossdock containers from any other company just like a port. The users can better select the stocking points of their products and make more flexible and responsive replenishment plans. Replenishments between open warehouses are also allowed in Physical Internet. This will contribute to improved inventory level and service rate to clients in contrast to traditional hierarchical and independent supply chains.
- The service capacity of nodes is available for contract on demand, on a per use basis, for processing, storage or moving activities.

Figure 5. illustrates a transition from private supply networks to an open, global supply web.



a) Five-single company distribution networks of a closed distribution web (Milenkovic, 2022)

b) Collaborative distribution web dedicated to five partnering companies (Milenkovic, 2022)

Figure 5. Transition from private supply networks to open, global supply web, five firms serving the markets in North America (Sohrabi et al., 2012)

3. Towards a PI-based CEP sector in Serbia

According to EU Green Deal, the ambition of the European Union is to be the first climate-neutral continent by 2050. Physical Internet supports the transition towards zero emission. According to a roadmap proposed by ALICE (Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe) full realization of Physical Internet is expected in 2040 (Alice, 2020).

PI implementation requires development of innovative and complex cooperative business models in order to enable open logistics network where resources are compatible accessible and easily interconnected. In terms of CEP delivery services, this requirement can be implemented through cooperation between a number of providers directly and indirectly engaged in a CEP service. The literature distinguishes numerous forms of cooperation such as (Rusich, 2017):

- Vertical cooperation – occurs between two or more business units operating at different layers of a same supply chain (shipper – LSP, LSP-carrier etc.). Vertical cooperations are essentially subcontracting relationships. In the CEP

sector, service providers often use subcontractors to supply different parts of the process (Bartucz et al., 2023).

- Horizontal cooperation occurs between two or more companies operating at the same industry level. It can be of different type, such as coexistence, cooperation, cooptation, competition. For example, in CEP sector, two courier companies share logistics resources (vehicles, drivers, hubs, software tools) to improve the delivery performances as a whole.
- Diagonal cooperation represents a bi-dimensional cooperation strategy aimed at enhancing supply chain flexibility.
- Interconnected cooperative logistics models are based on combining the basic three cooperative relationships at various levels and in various modes simultaneously, thus creating interconnected logistics networks.

At the moment, in Serbia, there is an established partnership between PE 'Post of Serbia' and DHL. This form of horizontal cooperation includes the sharing of 'know-how' and the use of PE 'Post of Serbia' facilities for the distribution of DHL services. Cooperative relationships based on sharing transport and storage capacities do not currently exist. Trust and data exchange issues are considerable barriers to the introduction of cooperative relationships. To address the lack of trust and the issue of data exchange between the actors, CEP carriers for example (in case of horizontal cooperation), the use of blockchain technology may represent a solution (Hribnik et al., 2020). Nowadays in Serbia, more than 50 courier companies operate, and all of them have their own hubs for manipulation with parcels. Each company has around 10 regional hubs. These hubs are exclusively used by the owning company. In the PI the role of distribution centers and warehouses will be changed to open hubs allowing shipments to flow through similar to the flow of data packets over the Internet. The hubs will be 100% neutral and independent. The number and locations of hubs will be optimized based on the network costs as a function of hub locations their number and routing. For example, DHL provides warehouse space sharing. American Seattle-based startup Flexe has also developed a marketplace for excess warehouse space (DHL, 2017). In line with PI concept, national Post Operator (Post of Serbia) as well as a number of private courier companies built a network of openly available locker terminals located in convenient and public locations. In the perspective of using Hyperconnected Modular Containers (π -containers), the lockers terminals should be able to communicate with the parcels (for example through RFID technology) enabling the system to get information from sensors, tracking location, and to change routing decisions (Fuagere and Montreuil, 2016). Establishing of standardization will also require substantial time and investments. PI requires standardization of information (data, formats, content), communication technology (data transfer, data access and IT functionalities), logistics products and mathematical optimization logics (Gasperlmair et al., 2016). Regarding π -containers, they can be differentiated on transport, handling and packaging containers (T/H/P containers respectively). The P containers are of smallest size and used for packing of physical goods. H-containers will be of middle size and used for handling purposes such as moving carrying and storing temporally a set of P-containers. The T-containers are used for transporting a huge volume of H-containers and/or P-containers across cities, counties and continents (Tran-Dang et al., 2020). In CEP market packets and pallets are used as the main loading units. The dimensions of π -containers and the sizes of the products which must be mutually aligned will be a subject to an international standard committee as well. Bigger operators in Serbia (such as Post of Serbia and other private operators) has already

made huge investments in handling and storage infrastructure and ICT so they will be reluctant to any radical change at least on a mid-term horizon. The actors on the CEP market have proprietary software solutions (transport management systems, warehouse management systems, ERP software) with different data structures which requires significant investment in the development of interfaces. PI requires synchronization between different modes of transportation. This concept, also known as synchromodality, represents an ability to switch freely between transport modes at certain nodes while meeting cost and service level requirements (Lemmens, 2019). On the level of CEP services, this would include the development of synchromodal urban delivery network which will enable the best choice among alternative options to deliver parcels to customers as well as a temporal synchronization of modes at multiple echelons. Currently in CEP sector in Belgrade (50% of CEP delivery is realized in Belgrade) there is a limited number of modes (vans, eco delivery by bike for some very light shipments) and delivery options (doorstep, lockers by a few operators) so there is no real possibility for redesigning the CEP delivery system.

5. Concluding remarks

CEP services represent a very challenging and dynamic market segment. Despite the fact that the CEP service is also a very profitable business, there is a space for improvement of its efficiency and sustainability. The concept of Physical internet can offer significant improvements in agility, robustness, resilience and environmental footprint of CEP services. In this paper, the concept of Physical Internet was described and its potential for implementation was analyzed in the context of CEP services in Serbia. In comparison with the rest of the world, in Serbia, there are no initiatives related to implementation of Physical Internet. One way to a growing exploration and adoption of Physical Internet would be a phased approach with incremental grow in terms of complexity and coverage of Physical Internet initiative. This can be realized though a continuous research and innovation action based on intensive collaboration between industry and academia.

References

- [1] Statista (2023, Nov 1). Courier, express and parcel (CEP) market volume in Serbia from 2015 to 2022 [Online]. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1219818/courier-express-parcel-market-volume-serbia/>.
- [2] C. Bartucz, L. Buics, and E. Sule, "Lack of Collaboration on the CEP Market and the Underlying Reasons – A Systematic Literature Review", *Sustainability*, 15, pp. 1-22., 2023.
- [3] Rusich, "Collaborative Logistics Networks", Doctoral Thesis, University of Trieste, Italy, 2017.
- [4] Montreuil "Towards a Physical Internet: Meeting the Global Logistics Sustainability Grand Challenge", *Logistics Research*, 3, 2-3, pp. 71-87, 2011.
- [5] Montreuil. (2012). Physical Internet Manifesto [Online]. Available at: https://www.slideshare.net/physical_internet/physical-internet-manifesto-eng-version-1111-20121119-15252441

- [6] M. Milenkovic (2022). Physical Internet: disruptive innovation for a sustainable supply chain. Mecalux [Online]. Available at: <https://www.mecalux.com/logistics-articles/physical-internet-milos-milenkovic>
- [7] H. Treiblmaier, K. Mirkovski, P. B. Lowry, and Z. G. Zacharia, "The physical internet as a new supply chain paradigm: a systematic literature review and a comprehensive framework", *The International Journal of Logistics Management*, 31(2), pp. 239-287.
- [8] B. Montreuil, E. Ballot, and F. Fontane, "An Open Logistics Interconnection Model for the Physical Internet", *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Romania, 2012.
- [9] F. Marino, I. Seitanidis, P. V. Dao, S. Bocchino, P. Castoldi, and C. Salvadori, "IoT enabling PI: towards hyperconnected and interoperable smart containers", *Proceedings of 6th International Physical Internet Conference*, pp. 349-362, England, 2019.
- [10] C. Dong, and R. Franklin, "From the Digital Internet to the Physical Internet: A conceptual framework with a simple network model", *Journal of Business Logistics*, 42(1), pp. 108-119, 2018.
- [11] W. Hofman, J. Spek, and C. Brewster, "Applying Blockchain Technology for Hyperconnected Logistics", *Proceedings of the 4th International Physical Internet Conference*, pp. 59-71, Austria, 2017.
- [12] B. Montreuil, R. D. Meller, and E. Ballot, "Towards a Physical Internet: The Impact on Logistics Facilities and Material Handling Systems Design and Innovation", *Proceedings of the 11th IMHRC*, pp. 11-23, USA, 2010.
- [13] H. Sohrabi, W. Klibi, B. Montreuil, "Modelling scenario-based distribution network design in a Physical Internet-enabled open Logistics Web", *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, pp. 1-12, Canada, 2012.
- [14] Alice, 2020. Roadmap to the Physical Internet. Alliance for logistics innovation through collaboration in Europe [Online]. Available at: <http://www.etp-logistics.eu/alice-physical-internet-roadmap-released/>
- [15] M. Hribernik, K. Zero, S. Kummer, and Herold, D.M., "City logistics: Towards a blockchain decision framework for collaborative parcel deliveries in micro-hubs", *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, pp. 1-8, 2020.
- [16] DHL, 2017. Sharing economy logistics. DHL Customer Solutions & Innovation [Online]. Available at: <https://www.dhl.com/discover/content/dam/dhl/downloads/interim/full/dhl-trend-report-sharing-economy.pdf>
- [17] L. Faugere, and B. Montreuil, "Hyperconnected city logistics: Smart lockers & Last mile delivery networks", *Proceedings of the 3rd International Physical Internet Conference*, USA, 2016.
- [18] Gasperlmaier, H.-C. Graf, S.-T. Hörtenhuber, F. Ehrentraut and C. Landschützer, "Go2PI – Practically proved steps to implement the Physical Internet", *Proceedings of the 3rd International Physical Internet Conference*, USA, 2016.

- [19] H. Tran-Dang, N. Krommenacker, P. Charpentier, and D. S. Kim, "Toward the Internet of Things for Physical Internet: Perspectives and Challenges", IEEE Internet Things Journal, 7, pp. 4711–4736, 2020.
- [20] N. Lemmens, J. Gijsbrechts, and R. Boute, "Sychromodality in the Physical Internet – dual sourcing and real-time switching between transport modes", European Transport Research Review, 11:19, pp. 1-10, 2019.

Abstract: *Tržište kurirskih, ekspresnih i paketskih usluga (KEP) predstavlja jedno najkonkurentnijih tržišta. Međutim, način na koji se paketi prevoze, pretovaraju, skladište i distribuiraju nije održiv sa ekonomske, ekološke i društvene tačke gledišta. U radu je opisan fizički internet (FI) kao jedan od inovativnih pristupa za poboljšanje efikasnosti i održivosti u transportu. Sa fokusom na nacionalno tržište KEP usluga, navedeni su osnovni pravci primene fizičkog interneta u domenu KEP usluga. Date su moguće koristi, prepreke u primeni koncepta kao i strategije za prevazilaženje ovih prepreka.*

Keywords: *kurirske, ekspersne, paketske, isporuka, fizički internet*

U SUSRET FIZIČKOM INTERNETU: UTICAJ NA CEP USLUGE U SRBIJI

Miloš Milenković, Nikola Knežević, Nebojša Bojović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.005>

TOTALNO INTEGRISANA AUTOMATIZACIJA SA IT TEHNOLOGIJAMA I POSLOVNA KOMUNIKACIJA U POŠTANSKIM CENTRIMA I PROCESIMA

Milan Bukumirović¹, Slobodan Pećanac², Bojan Stanivuković¹

¹Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,

²Telekom Srbija a.d.

m.bukumirovic@sf.bg.ac.rs, slobodanpec@telekom.rs, stanivukovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Poštanski centri kao delovi savremenih preduzeća prerastaju u automatizovana postrojenja sa automatski integrisanim procesima i operacijama na svim nivoima. Automatizovana proizvodnja obuhvata i elektronsku razmenu podataka u celoj strukturi proizvodnog sistema. Automatski procesi sa razmenom informacija međusobno – horizontalno i vertikalno, omogućuju istovremeno integralnu automatsku komunikaciju na raznim i svim nivoima. Ovo se postiže primenom IT tehnologija u automatizaciji. Dostupnost informacija i automatskih komunikacija – kvantitativnih, a naročito kvalitativnih omogućuje rukovodstvu – menadžmentu preduzeća da donosi brze i uspešne poslovne odluke i efikasno ih sprovodi. Troškovi u raznim sektorima preduzeća primenom automatizacije i IT tehnologija snižavaju se od 15% do neverovatnih 50%.*

Ključne reči: *automatizacija, IT tehnologije, poštanski centar*

1. Uvod

Automatizacija procesa koja obuhvata i robotizaciju određenih, pa i svih proizvodnih operacija, je glavni pravac razvoja i/ili usavršavanja proizvodnje, kako generalno, tako i u poštanskim sistemima. Uvođenjem upravljačke tehnologije i integracijom komunikacionih dostignuća, odnosno IT tehnologije, postiže se savremena totalno integrisana automatizacija – TIA.

Tradicionalna struktuiranost proizvodnih preduzeća na organizacione celine u savremenim poštanskim centrima gubi tu formu, naročito posmatrano sa aspekta upravljanja i poslovanja primenom IT tehnologija. Sprovedenu automatizaciju proizvodnje od najnižeg nivoa – od aktuatora (izvršnih uređaja do završnog proizvoda tj. na nivou poštanskog sistema: poštanskim centrima i logističkim centrima mora da prati puna informatizacija i komunikacija na svim nivoima. Reč je o računarski podržanoj – računarskoj automatizaciji procesa i poslovanja, tj. o CIM (Computer Integrated Manufacturing) i elektronske razmene podataka EDI (Electronic Data Interchange) povezanih i integrisanih na nivou poštanskog centra (PC) šireg poslovnog okruženja – PC

i logističkog poštanskog centra (LPC), odnosno poštanski sistem (PS), tj. primenom IT tehnologija.

2. Hijerarhijska struktura proizvodnih sistema

Organizaciona struktura klasičnih proizvodnih sistema uspostavljena je prema toku proizvodnog procesa. Prema fazama proizvodnje formiraju se proizvodne celine sa odgovarajućom proizvodnom opremom. Ova struktura važila je praktično sve do pojave automatizacije i IT tehnologija, odnosno što veće integracije upravljačkih komunikacionih dostignuća u automatizovane proizvodne sisteme.

2.1. Hijerarhijska struktura automatizovanih proizvodnih sistema i njihovih informaciono – komunikacionih sistema

Elementi sistema – proizvodna sredstva, tehnološka i tehnološko - transportna sredstva sa uređajima i ostala sredstva mehanizacije pretovara, elementi upravljanja i sl., smatraju se prvim – najnižim hijerarhijskim nivoom (rangom) [1].

Drugi nivo predstavljaju podsistemi, kao najkarakterističniji, proizvodne (protočne) linije – linije pakovanja, transportne linije ili pravci, čvorovi, informacioni blokovi itd.

Treći nivo predstavljaju navedene linije ili blokovi (punktovi) objedinjeni u nezavisne podsisteme.

Četvrti nivo su sektori prerade, sektor skladišta, automatski sistemi upravljanja i sl.

Peti, najviši nivo predstavlja preduzeće u celini – proizvodni sistem, (koje se posmatra kao sistem). Stoga kompleksa preduzeća očigledno predstavljaju složene sisteme sa najvišim rangom i dele se na 4 (četiri) osnovna specijalizovana sistema, gradeći piramidalnu višenivoosku strukturu.

Kvalitet višenivooske strukture je različitog značaja po nivoima, tako što značaj raste sa nivoom. [1]

Automatizacija procesa stalno je vezana sa stvaranjem različitih sistema upravljanja, koji ispunjavaju funkciju kontrole i regulisanja tehnoloških procesa, zamjenjujući čovjeka. Razlikuje se nekoliko nivoa automatizacije:

1. Lokalna automatizacija
2. Automatizacija faza tehnoloških procesa
3. Automatizacija upravljanja procesom ili sistemom prerade

Treći, najviši nivo-automatizacija upravljanja procesom ili sistemima prerade, predstavlja stvaranje automatizovanih sistema planiranja i upravljanja cjelokupnim tehnološkim procesom korišćenjem računarske tehnike (u literaturi se ovaj nivo automatizacije susreće i pod nazivom potpuna ili kompleksna automatizacija).

2.2. Informaciono – komunikaciona struktura u proizvodnom preduzeću

Informaciona struktura tehničkih sistema prati njihovu tehničku hijerarhijsku strukturu. Informacije se stvaraju i prenose u njima odakle počev od mesta gde im je fizičko

polazište. S obzirom na mesta stvaranja informacija, informacije se počev od “najnižeg” početnog nivoa uređaja ili fizičkog izvršioca operacija smanjuju po broju ali ne i po važnosti (kvalitetu). Informacije sa aktuatora i drugih uređaja naročito su važne za nivo mašina i robota zbog mogućeg redoslednog i paralelnog rada upravljanja aktuatorima i uređajima, a isto tako i pri stupnjevitom (etapnom) upravljanju uređajima i tehničkim sistemima tj. lokalne automatizacije.

2.3. Nivoi komunikacija u automatizovanim poštanskim sistemima

Na različitim hijerarhijskim nivoima poštanskog proizvodnog sistema (PPS) informacije u početnoj fazi se uglavnom dobijaju od uređaja i mašina, ali i od izvršioca i rukovodioca, u zavisnosti od strukture dobijanje značajnih informacija od izvršioca i rukovodilaca u pošti se ostvaruje u lokalnim poštama gde se obavlja sakupljanje i distribucija pošiljaka, unosom podataka. Skoro na isti način se dobijaju podaci i na pr. o prispelim i distribuiranim pošiljkama u poštanskim logističkim centrima (PLC), sa pratećom dokumentacijom.

Već na nivou prispeća pošiljaka u PC prerade počinje proces automatske prerade pošiljaka, sa dobijanje podataka i informacija kao i početak tokova komunikacija značajnih za proces i poslovanje. U automatske mašine (CN I CNC), kao i transportere, robote, automatizovane (automatske) viljuškare, kao i druge komponente ugrađujući se specijalizovanim senzorima i mikroprocesori koji omogućavaju jednostavno dobijanje, kontrolu i prenos podataka, informacija i komunikacija (1,2,3).

Povezivanjem mašina u industrijsku računarsku mrežu (NCS- Networked Control System) čija je osnova zajednička industrijska magistrala, omogućeno je zajedničko povezivanje svakog pojedinačnog uređaja i mašine za magistralu (kabl).

Korišćenjem industrijskih magistrala [magistrale uređaja (device bus) i procesnih magistrala (process bus)] u industrijskim računarskim mrežama sa svim praćenim uređajima i protokolima omogućeno je:

- Dobijanje velikog broja podataka i informacija (od uređaja, mašina, proizvoda, pogona, fabrike,...)
- Prenos podataka, kratkih poruka i prenos paketa podataka.
- Mreža ima izuzetno veliku brzinu prenosa poruka (što povećava verovatnoću da se poruka prenese) u traženom vremenskom period.
- Priključenje raznovrsnih uređaja od najjednostavnijih do “inteligentnih” uređaja (robotizovanih uređaja i robota.)

Automatizovani – računarski upravljački poštanski sistem (PS) podrazumeva digitalizaciju svih podataka i informacionih tokova i formiranje baze podataka za ceo sistem kao i osnove za upravljanje i informacionu integraciju svih računarskih aktivnosti unutar sistema i između različitih poslovnih sistema. To znači da se u potpunosti napušta klasično poslovanje papirnom dokumentacijom, i prelazi se na kvalitetnije poslovanje preduzeća integracijom automatizovanih mašina i operacija (CIM koncept) i elektronske razmene podataka (EDI koncept). To predstavlja povezivanje i komunikaciju između različitih računara strukturnim podacima, elektronskim putem, koristeći komunikacione i informacione softvere, bez posredovanja operatera. Uz to, primena EDI- ja podrazumeva da se podaci koji se razmenjuju moraju imati strukturu koja obezbeđuje nedvosmisleno

prepoznavanje sadržaja i dalju računarsku obradu, primenom osnovnih principa EDI-ja: elementa podataka (prostih i složenih, segmenata, poruka i funkcionalnih grupa i razmene poruka [6].

Sa aspekta globalne integracije proizvodnih i poslovnih aktivnosti u preduzeću i okruženju, kojom se postiže viša efikasnost, sastoji se u sledećem:

- Povezuje se oprema i komponente različitih proizvođača (mašina, računara, upravljačkih sistema).
- Omogućuje se veza preduzeća sa poslovnim okruženjem (npr. bankama, osiguravajuća društva, dobavljači, transporter, kupci,...).

Aktivnostima prikupljanja i selekcije podataka (izdvajanje značajnih) i njihovo grupisanje u obliku formirane poruke za viši strukturni i informacioni nivo izvršava se računarski zajedno i istovremeno, prema standardnim programima. Pomoću mrežnih servisa i mrežnih protokola povezuju se podaci i formiraju krajnji dokumenti, pogodnim za EDI razmenu i/ili poslovnu komunikaciju (1,2,5,6).

Totalno integrisana automatizacija (odnosno automatizacija + IT tehnologije) predstavlja integraciju proizvodnje, programiranja, obrade podataka i komunikacija. Ova činjenica obezbeđuje najveći mogući stepen integracije za čitav niz proizvoda preduzeća.

3. Poslovne komunikacije (Tokovi informacija) u poštanskom saobraćaju

U strukturi višenivooskog – složenog proizvodnog sistema (kakvi su PC i PLC) neophodan je i prisutan neprekidni tok informacija tj. poslovna komunikacija. Informacije i podaci se prikupljaju i razmenjuju – komunicira se poslovno na različitim nivoima i između pojedinih nivoa. Klasični nivoi organizacije proizvodnih sistema kod automatizovanih sistema se svodi na maksimalno 4 nivoa: mašina, proizvodni segment (grupa mašina, operativna odeljenja), pogon i menadžment.

Na prvom – na nivou mašine razmenjuju se informacije. Komunikacije su: između mašine pomoću njenih strukturnih uređaja i predmeta rada.

Na drugom nivou odeljenja informiše se i komunicira između mašine i ostalih mašina koji proizvode predviđene predmete rada (komunikacija čovek- mašina) (nivo 2).

To su horizontalne među mašinske informacije koje u rezultatu daju podatke i informacije o broju (količini) elementarnih proizvoda (poštanskih pošiljaka robe) i/ili stepenu njihove izrade (obrade, prerade), količinama i slično.

U savremenim automatskim proizvodnim sistemima u ovom toku informacija ne uključuje se čovek – rukovodilac (tj. ostvaruju se komunikacije čovek – mašina i mašina – čovek). Prikupljanje informacija o elementarnim proizvodima (pošiljkama) prosleđuju se vertikalno na sledeći nivo.

Obe vertikalne informacije – vertikalne komunikacije se prenose automatski između tehničkih struktura (mada mogu biti uključeni u manjoj ili većoj meri rukovodioci i izvršioци). Komunikacija je interpersonalna i može biti: komunikacija između dve osobe, kao i komunikacija u grupi, analogno između dva uređaja, grupe uređaja, između mašina.[3,5].

“Vertikalno povezivanje“ je formula sadašnjosti i budućnosti u poštanskoj industriji.

Na vrhu informaciono – komunikacione piramide nalazi se menadžment preduzeća, tj. menadžment složenog poslovno – proizvodnog sistema (korporacije). Jasno je da informacije su različite po intenzitetu (broju) i kvalitetu [4]. Analiza i selekcija podataka i informacija i njihovo prosleđivanje – ostvarivanje komunikacija sa nižeg nivoa na viši nivo u automatizovanim PS-a realizuje se automatski pomoću odgovarajućih programa (softvera) i potprograma a i neke se dobijaju direktno od rukovodilaca odeljenja i pogona tj. funkcionalnih celina preduzeća (PS).

Podaci – informacije o prispelim pošiljkama u PC (Σ_{lup}), koji su istovremeno ulazna proizvodna informacija (Σ_{lu}) selekcionišu (na pr. pismoonošne pošiljke ($\Sigma_{lup.p.}$) i paketske pošiljke ($\Sigma_{lu.pk}$) se prosleđuju na mašine za preradu pošiljaka. Istovremeno dobijaju se u PC ili poštanskom sistemu (PS) ulazno/izlazne informacije prispeća i distribucije robe (Σ_{lplc}). Informacije o stanju pojedinačne mašine (I_{SM1}) prerađenim pošiljkama na njoj ($I_{p.pM1}$), kao informacija i komunikacija unutar mašine ($I_{KM1,...n}$) prenose se u mašinsko odeljenje sa više mašina (1...n), ali se programski selekcionišu samo važne za ukupni rad mašine ($I_{M,1}$). U mašinskom odeljenju automatski komuniciraju mašine međusobno tako da se imaju ukupne informacije ($\Sigma_{IM.O} = I_{KM1} + I_{KM2} + ... + I_{KMn}$). Za sledeći nivo pogon predaje sortirana svih poštanskih pošiljaka u PC selekcionišu se sve informacije sa mašina i prosleđuju informacije ($\Sigma_{IM.O.S}$). Na isti način i istovremeno se dobijaju selekcionisane informacije iz administrativnog i računarskog sektora (odeljenja) ($\Sigma_{Ia.r.s}$). Na ovom nivou selekcionišu se informacije i komunikacije prispele po vertikali sa nižeg nivoa kao iz svojih horizontalnih informacija – komunikacija na svom nivou. Ovakvo odabrane informacije i komunikacije vertikalno se prosleđuju na nivo proizvodnog pogona (sektora) prerade pošiljaka PC-a. Na nivou proizvodnog pogona PC-a dobijaju se informacije i komunikacije, koje su ovde izraženije u odnosu na niže nivoe, i uključuju prispele po vertikali – iz odeljenja automatskih mašina. Od svih ovih informacija i komunikacija selekcionišu se najvažnije u poslovno – tehnočkom smislu – informacije pogona ($I_{p.s}$) i komunikacije pogona ($I_{p,k,s}$) i upućuju poslovnom vrhu preduzeća vertikalno za korišćenje tj. optimalno profitabilno upravljanje.

3.1. Međuračunarske komunikacije u procesnim informacionim sistemima

Povećanjem nivoa automatizacije složenih tehnoloških objekata upravljanja (TOU) – tehnoloških postrojenja rasta i kompleksnost primijenjenih sistema automatskog upravljanja. Osnovu procesnog informacionog sistema (PRIS), kao tehničkog sistema mreže računarskih sistema i međuračunarskih komunikacionih veza čine snažni mini u mikro računari. Kao posrednici u razmjeni podataka sa procesom ugrađuju se mikroprocesori.

U svakom PRIS-u pri upravljanju procesima sve aktivnosti se mogu svrstati u dvije cjeline:

- Prikupljanje i prenos podataka i informacija
- Analizu, obradu memorisanje, registrovanje i prikaz podataka i informacija

Višehijerarhijska mreža računara, koja se uspostavlja za rješavanje druge grupe zadataka ima polaznu organizacionu strukturu

Hijerarhijsku strukturu mreže PRIS-a realizuje dve klase komponenata računarske tehnike:

- Komunikacijski računari (čvorovi FEP- Front End Processor)
- Analitičko prikazani računari (čvorovi HOST)
- Komunikacijske linije (veze)

U organizacionoj hijerarhijskoj strukturi PRIS-a, računari sa svom pratećom opremom ugrađuju se u čvorove sistema, a komunikacione linije sa pripadajućom linijskom opremom predstavljaju grane informacione mreže.

Nametnute potrebe za višim nivoima komunikacija između komponenata i/ili segmenata PRIS-a uspješno se rješavaju povezivanjem računara u lokalne računarske mreže LAN (Local Area Network).

Najbolja karakteristika TIA kontrolnog podsistema je to što je on integrisan. Sistemi kontrole proizvodnje i kontrole procesa koriste isti hardver. Računarski sistemi koriste isti softver.

4. Komunikacije u poštanskom saobraćaju i Menadžment preduzeća

U automatizovanom preduzeću (proizvodnom i poslovnom sistemu) posredstvom informacija i njihovih vertikalnih tokova tj. internim komunikacijama ka i na najvišem nivou upravlja preduzeća (menadžment) ima potpuni uvid u proizvodni učinak preduzeća, efikasnost pojedinih segmenata u poslovanje preduzeća. Time su ostvarene osnove za efikasno upravljačko delovanje unutar preduzeća, kao i za eksternu komunikaciju (vertikalne upravljačke komunikacije).[6,7]

Komunikacije i međusobno delovanje unutar PS-a (PC i PLC) obuhvaćen je (opštim) upravljačkim programom (softverom) za proizvodnju. Ova “proizvodni program” se sastoji iz niza potprograma, koji su uglavnom vezani za strukturne proizvodne nivoe. “Proizvodni program” je osnova za praćenje, komunikacije i upravljanje radom preduzeća. U njega su ugrađene i informacije o radu preduzeća u sektoru proizvodnje: broj mašina u proizvodnji (sortiranju), vreme rada i učinak mašina, potrošnja električne energije, otpлата mašina, amortizacija, svi podaci o radu i broju radnika, o infrastrukturi što se ustvari odnosi na sve troškove proizvodnje. Očigledno je da ukupni “proizvodni program” kao i njihovi prodprogrami moraju da obuhvate kako horizontalne komunikacije tako i vertikalne – ulazne i silazne.

Visoko ili potpuno automatizovani procesi na automatizovanim mašinama za sortiranje pismonosnih pošiljaka i paketa; i/ili linijama za skladištenje (distribuciju) u PLC-a, informaciono i komunikaciono su međusobno povezani, kao i sa upravljačkom strukturom procesno – poslovnog sistema (inž. proizvodnje, inž. programa, pogonski menadžer, top menadžer).

Na taj način uprava (menadžment) poštanskog centra i PS-a ima uvid u sve elemente procesa i logistike kao i komunikaciju sa svim objektima i faktorima sistema. Time je u mogućnosti da ostvari optimalnu upravljačku i poslovnu komunikaciju u funkciji maksimalno profitabilnog poslovanja PS-a.

TIA je u početku predstavljala sistem potpune automatizacije, ali je uvođenjem upravljačke komunikacione (IT) tehnologije, ona se proširuje znatno preko granica inženjerske primene na sve ostale poslovne oblasti.

U automatizovanim procesima proizvodnje obično nisu mašine te koje određuju troškove. Troškovi se u najvećem delu odnose na upravljanje, programiranje, obučavanje

radnika, rezervne delove, održavanje i servisiranje. Primenom TIA-e sa IT tehnologijama troškovi su niži do 25% i ukupnom radnom veku opreme.

TIA je trenutno najuspešniji concept automatizacije. Primenom TIA-e sa IT tehnologijama moderni proizvodni sistemi imaju značajnu uštedu u inženjerskim poslovima; u nekim slučajevima čak i do 50%.

Automatizovane strukture sa TIA konceptom koji široko uključuje IT tehnologije su jasno i transparentno povezane od upravljačkih struktura do samih uređaja i mašina, što omogućava lakše lociranje i otkrivanje grešaka, kao u njihovo otklanjanje. Optimizacija procesa, dodatno uvođenje segmeta procesa i razne izmene se veoma lako sprovede, sa najmanjom mogućom merom narušavanja proizvodnog procesa.

5. Zaključak

Savremeni poštanski centri su opremljeni automatskim mašinama za prerađu pošiljaka velikih kapaciteta. Takođe u njihovim sastavima su značajni logistički sistemi sa automatizovanim i robotizovanim procesima rada. U bliskoj budućnosti se očekuje i široka primena dronova u dostavi pošiljaka.[8]

U tako složenim procesima i sistemima neophodno je integrisati sakupljanja i prerađu pošiljaka, procese rada logističkog sistema, komunikacije sa upravljanjem i poslovanjem preduzeća. To se postiže neposrednom automatizovanih mašina i IT tehnologija uz optimalnu komunikaciju unutar sistema – horizontalno i vertikalno. Sve to omogućuje optimalni menadžment u preduzeću sa izuzetom dobiti.

Literatura

- [1] M. Bukumirović - *Automatizacija procesa rada u poštanskim sistemima*. Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, 1999 god.
- [2] M. Bukumirović, A. Čupić – *Tehnologija mehanizovane prerađe poštanskih pošiljaka*, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet 2012g.
- [3] M. Bukumirović – *Urbana logistika*, Mašinski fakultet, Kraljevo 2009g.
- [4] T.Cvetkovska, V.Cvetkovska – Vuković – *Poslovna komunikacija u savremenim uslovima školovanja*, Megatrend Univerzitet, Beograd 2007g.
- [5] S. Pećanac – *Nove medijske tehnologije i infrastrukturni dijalog* (doktorska disertacija), Megatrend Univerzitet, Beograd 2014g.
- [5] N. Stefanović, Ž. Spasić – *Elektronska razmena informacija u SIM preduzeću. 16 simpozijum: SIM u strategiji tehnološkog razvoja prerađu metala*, Beograd 1997g.
- [6] M. Dobrodolac, D. Lazarević, B. Stanivuković, Model za unapređenje organizacije službe za ekspres prenos pošiljaka, *Zbornik radova XXXIV Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2016*, 103 – 114, November 29 – 30, Beograd, 2016.
- [7] Siemens; *Totally integrated automation*, tehnička dokumentacija (internet, prospekti,...)
- [8] J. Milutinović, D. Marković, B. Stanivuković, L. Švadlenka, M. Dobrodolac „A model for public postal network reorganization based on DEA and fuzzy approach” *Transport* 35(4), 401-418. 2020. DOI: 10.3846/transport.2020.13741

Abstract: *Modern companies - postal centers are growing into automated ones (Computer Integrated Manufacturing) with automatically integrated processes and operations at all levels. Automated production also includes electronic data exchange in the entire structure of the production system. Automatic processes with mutual information exchange - horizontally and vertically, simultaneously enable integral automatic communication at various and all levels. This is achieved by applying IT technologies in automation. The availability of information and automatic communications - quantitative and especially qualitative - enables the company's management to make quick and successful business decisions and implement them effectively. Costs in various sectors of the company through the application of automation and IT technologies are reduced from 15%, 25% to an incredible 50%.*

Keywords: *automation, IT technologies, postal center*

TOTALLY INTEGRATED AUTOMATION WITH IT TECHNOLOGIES AND BUSINESS COMMUNICATION IN POSTAL CENTERS AND PROCESSES

Milan Bukumirović, Slobodan Pećanac, Bojan Stanivuković

POŠTANSKI SAOBRAĆAJ, MREŽE I SERVISI

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.006>

MODELI ZA UNAPREĐENJE KONKURENCIJE NA TRŽIŠTU POŠTANSKIH USLUGA

Dragan Pejović, Ljubomir Ostojić, Sonja Gezović, Mila Milošević
Regulatorno telo za elektronske komunikacije i poštanske usluge (RATEL),
dragan.pejovic@ratel.rs, ljubomir.ostojic@ratel.rs,
sonja.gezovic@ratel.rs, mila.milosevic@ratel.rs

Rezime: RATEL je razvio 3 (tri) modela za unapređenje konkurencije na tržištu poštanskih usluga: GIS portal za prikazivanje kvaliteta dostupnosti mreže poštanskih operatera (poslovnice, paketomati, teritorija dostave), Portal cena za poređenje cena ekspres i kurirskih poštanskih usluga i Model za benčmark parametara kvaliteta ekspres poštanskih usluga. Cilj razvoja navedenih modela je da se kroz podsticanje konkurencije na tržištu poštanskih usluga, unapredi kvalitet i poveća zadovoljstvo korisnika.

Ključne reči: Poštanske usluge, konkurencija, GIS portal, Portal cena, benchmark

1. Uvod

Zakonodavac je definisao mere za unapređenje konkurentnog tržišta u Republici Srbiji i kao nosioca aktivnosti u okviru ove mere prepoznao Regulatorno telo za elektronske komunikacije i poštanske usluge (u daljem tekstu: RATEL), koji aktivnosti sprovodi u saradnji sa poštanskim operatorima. RATEL je u cilju ispunjenja zacrtanih ciljeva za razvoj poštanskih usluga u Republici Srbiji¹ tokom 2022. godine definisao tri modela za unapređenje konkurentnog tržišta: portal *ceneusluga.rs*, GIS portal i *benchmark* ekspres poštanskih usluga.

U okviru portala *ceneusluga.rs* obezbeđeno je upoređivanje cena poštanskih operatera koje korisnici mogu da pretraže na jednom mestu, kao i da poređenjem ponude poštanskih operatera izaberu željenu uslugu. Portal je obezbedio benefite za poštanske operatore, posebno za nove učesnike na tržištu u vidu promocije delatnosti.

Drugi model za podsticanje konkurencije na poštanskom tržištu Republike Srbije je GIS portal za poštanske usluge. Namena GIS portal-a se ogleda u mogućnosti prostornog prikazivanja i pretraživanja elemenata poštanske mreže svih aktivnih poštanskih operatera

¹ *Strategija razvoja poštanskih usluga u Republici Srbiji za period 2021-2025. godine*, „Službeni Glasnik RS“, broj 68/2021

(lokacije poslovnica, paketomata, poštanskih sandučića, pokrivenost dostavom prema vrsti usluge koja se pruža). GIS portal je razvijen kao alat koji, sa jedne strane, pruža informacije korisnicima poštanskih usluga, a sa druge, alat koji može da pomogne u radu poštanskim operatorima.

Tokom 2022. godine RATEL je započeo i aktivnost poređenja kvaliteta ekspres usluga poštanskih operatora, merenjem kvaliteta ekspres usluga u unutrašnjem poštanskom saobraćaju za 5 najvećih poštanskih operatora, čiji je udeo na tržištu veći od 99%, odnosno *AKS Express kurir doo Šabac, BEXExpress doo Šabac, CITY Expres doo Beograd, DExpress doo Beograd i JP „Pošta Srbije“, Beograd (Postexpress)*.

Osnovni cilj merenja je da se korisnicima pruži uvid u kvalitet obavljanja ekspres usluga u Republici Srbiji, zatim da se operatorima posredno ukaže na eventualne „slabije tačke“ u procesu pružanja usluga, kao i da ovi uporedni rezultati doprinesu podsticanju konkurencije na tržištu, odnosno unapređenju kvaliteta usluga.

2. Modeli za unapređenje konkurencije na tržištu poštanskih usluga

2.1. Portal cena

2.1.1. Portal ceneusluga.rs - model

Portal *ceneusluga.rs* je aplikacija u kojoj su operatori koji posluju na tržištu poštanskih usluga prikazali svoje cene. Aplikacija za poređenje cena usluga, portal *ceneusluga.rs* obezbeđuje pristup za tri vrste korisnika portala:

1. krajnje korisnike koji pristupaju javno dostupnom delu portala *ceneusluga.rs* u svrhu pretraživanja cena usluga elektronskih komunikacionih mreža i usluga i poštanskih usluga;
2. operatore elektronskih komunikacionih mreža i usluga i operatore poštanskih usluga koji koriste portal u svrhu unosa, izmene i eventualno brisanje prethodnih cenovnika usluga iz oblasti elektronskih komunikacija i poštanskih usluga;
3. administratore portala *ceneusluga.rs*, tj. autorizovano osoblje RATEL-a, koje je zaduženo da prati proces registracije predstavnika operatora.

Svaki korisnik, osim krajnjih korisnika, mora biti autorizovan pre pristupa sistemu. Potvrda se vrši na nivou korisnika i na osnovu prava korisničke grupe kojoj korisnik pripada. Administraciju predstavnika operatora obavlja administrator portala *ceneusluga.rs* iz RATEL-a, i na osnovu kreiranih pristupnih parametara lice imenovano za predstavnika operatora se na portalu *ceneusluga.rs* autentifikuje. Podatke u aplikaciju unosi isključivo predstavnik operatora koji je registrovan.

Softver podržava servisno orijentisanu arhitekturu (SOA) – pristup koji treba da omogući laku integraciju i uvoz podataka iz ostalih informacionih sistema koji se koriste u RATEL-u. Sistem podržava evidentiranje i praćenje svake aktivnosti po svakom modulu.

Prezentacioni sadržaj se prikazuje na srpskom (ćirilica i latinica) i engleskom jeziku, i omogućen je adekvatan prikaz na različitim uređajima korisnika, u skladu sa prilagodljivim (*RWD – Responsive Web Design*) dizajnom. Na aplikativnom nivou je obezbeđena zaštita od deset najpopularnijih sajber napada (*OWASP TOP 10*).

2.1.2. Portal *ceneusluga.rs* -rezultati i benefiti

Konkurenciju na poštanskom tržištu, u domenu ekspres usluga u unutrašnjem poštanskom saobraćaju, je istraživala Komisija za zaštitu konkurencije² (u daljem tekstu: KZK), u periodu od 2019. do 2021. godine, analizirajući odnose između konkurenata na tržištu poštanskih usluga. Analiza je urađena u cilju sagledavanja stanja i dinamike konkurencije na tržištu poštanskih usluga i ukazivanje na eventualne probleme poput ograničenja ili bilo koje druge vrste narušavanja ili sprečavanja konkurencije koja utiče na učesnike na tržištu.

Kao jedan od rezultata analize, KZK je iznela ocenu da je struktura tržišta u Republici Srbiji oligopolistička, pri čemu pet velikih operatera kontroliše 99% tržišta, bez dominantnog učesnika na tržištu, kao i da postoji sukcesivno povećavanje cena usluga kod nekoliko poštanskih operatera, što može da ukaže na paralelizam, ili na moguće horizontalne sporazume o cenama. Vodeći se načelima transparentnosti i nediskriminacije, date su preporuke za regulatora, da bi trebalo da se stvore jednaki uslovi korisnicima poštanskih usluga prilikom izbora poštanskih operatera.

Portal *ceneusluga.rs*, pre svega, obezbeđuje veću transparentnost cena na poštanskom tržištu, ali omogućava i dodatne benefite i za operatore i za korisnike. Za korisnike je obezbeđena preglednost cena usluga i mogućnost poređenja u određenoj kategoriji. Dok je za poštanske operatore, koji su novi i pokušavaju da se pozicioniraju na tržištu, obezbeđena vidljivost i bolja dostupnost do krajnjih korisnika.

Operatorima kurirskih usluga, koji uglavnom posluju samo na području jednog grada, na ovaj način je omogućena promocija, posebno za one koji ne poseduju internet stranicu, da postanu vidljiviji i pristupačniji korisnicima, dok je za one koji imaju internet stranicu obezbeđena direktna veza do iste preko portala *ceneusluga.rs*.

Aplikacija je takođe povezana sa GIS portalom, što predstavlja dodatni benefit, jer se na ovaj način na istom mestu korisnicima pruža informacija o lokaciji poslovnica poštanskih operatera ili paketomata, kao i pokrivenost dostavom za ekspres operatore na teritoriji Republike Srbije, a za kurire na teritoriji grada.

Portal *ceneusluga.rs* za poštanske usluge omogućava pretragu po vrsti sledećih usluga: Ekspres usluga „Danas za sutra“, Ekspres usluga „Danas za danas“, Ekspres usluga „Ostalo“ - za operatore koji pružaju usluge samo pravnim licima, „Kurirske usluge“.

Nakon odabira vrste usluge, unosi se masa pošiljke. Opciono, moguće je uneti vrednost i otkupninu, za koje su date cene za reprezentativne primere usluga. Ove opcije omogućavaju uvid u osnovne cene, dok je za detaljne cene obezbeđen direktan pristup cenovniku u PDF formatu, kao i internet stranici operatera, gde se kod nekih operatera nalazi i kalkulator cene za sve usluge. Pored ovih podataka operator unosi i dodatne usluge, teritoriju, rokove uručenja i dr.

Kada korisnik izabere uslugu, masu i opciono vrednost i/ili otkupninu sa desne strane se izlistavaju svi operatori koji imaju definisanu cenu za tu vrstu usluge (*Slika 1*). Za ekspres operatore za usluge „Danas za sutra“ prikazuju se cene za 14 operatera. Za ekspres operatore za usluge „Danas za danas“ prikazuju se cene za 6 operatera. Za ekspres

² [Izveštaj o sprovedenoj Sektorskoj analizi stanja konkurencije na tržištu ostalih poštanskih usluga \(kurirskih službi\) u periodu 2019-2021. godina](https://kzk.gov.rs/izvestaj-o-sprovedenoj-sektorskoj-an-3), Komisija za zaštitu konkurencije, <https://kzk.gov.rs/izvestaj-o-sprovedenoj-sektorskoj-an-3>

operatore – „Ostalo“, koji usluge pružaju samo pravnim licima, prikazuju se cene za 6 operatora.

Филтери

Имени тип

Врста поштанске услуге:

- ☒ Експрес услуга - Данас за сутра
- ☐ Експрес услуга - Данас за данас
- ☐ Експрес услуге - остало
- ☐ Курирске услуге

Маса пошиљке (кг):

од 0.501 до 1 kg

Вредност пошиљке:

1.000,00

Откупна цена пошиљке:

1.000,00

Наложница, услуга, општински гласови на поштомачкој рачуни

Оператор

Одаберите оператора

ПОИШТИ ФИЛТЕРЕ

ПРИМЕНИ ФИЛТЕРЕ

Сортирано по:
 цени растуће

Број приказа по страници:
 10

NANI SISTEM DOO BEOGRAD

Данас за сутра - ЦЕНОВНИК "ДАНАС ЗА СУТРА"

Рокови уручења	Територија	Цена
наредног дана до краја радног времена (18.00h)	Београд и 80km од Београда	300 РСД

FLEX KURIR D.O.O. BEOGRAD

Данас за сутра - Данас за сутра

Рокови уручења	Територија	Цена
24	Београд	340 РСД

ПОШТА ЈП „ПОШТА СРБИЈЕ“

Данас за сутра - Ценовник Пост експрес услуга у унутрашњем саобраћају

Рокови уручења	Територија	Цена
Наредног дана до 19 часова	Република Србија	350 РСД

GEBRÜDER WEISS TRANSPORT AND LOGISTICS DOO DOBANOVCI

Слика 1: Prikaz cene ekspres poštanskih usluga „Danas za sutra“

Za kurire koji obavljaju poštanske usluge direktno od pošiljaoca do primaoca i za ekspres operatore koji pružaju usluge samo za pravna lica, poput logističara, omogućena je pretraga samo po teritoriji.

Kao rezultat pretrage se ne pojavljuje konkretna cena već cenovnik u PDF formatu, opšti uslovi i dodatne informacije, poput linka ka GIS portalu i internet stranici operatora, ukoliko je operator ima.

Na portalu se nalaze podaci od 26 kurirskih službi koje su aktivne na tržištu poštanskih usluga (Slika 2).

Aplikacija omogućava i poređenje do tri poštanska operatora za konkretnu uslugu, što je dodatna vrednost ovog modela za korisnika, jer daje direktno poređenje detaljne ponude izabranih operatora.

U toku je dopuna modela za slanje pošiljaka u međunarodnom ekspres poštanskom saobraćaju, čime će se zaokružiti kompletan set usluga na teritoriji Republike Srbije, koje su u ponudi operatora za korisnike poštanskih usluga.

The screenshot shows the website **ceneusluga.rs** with a search bar at the top containing the URL `a_usluga&teritorija=&operator=&sort=price_asc&per_page=10`. The left sidebar has a 'Povezani tipovi' button and a 'Vrsta poštanske usluge:' section with radio buttons for 'Ekspres usluga - Danas na putu', 'Ekspres usluga - Danas na danu', 'Ekspres usluga - ostalo', and 'Kurirska usluga' (which is selected). Below this is a 'Teritorija:' dropdown menu set to 'Sve gradove'. The 'Operator' section has a 'Sadržaj operatora' input field and buttons for 'Prikaži rezultate' and 'Prikaži rezultate'. The main content area lists several courier services, each with a 'Kurirska usluga' section showing the territory and buttons for 'Cenovnik' and 'Opšti uslovi'.

Slika 2: Prikaz pretrage na portalu za kurirske usluge

2.2. GIS portal

Geografski informacioni sistem (GIS) je sistem podrške odlučivanju koji omogućava da se prostorno referencirani podaci integrišu u poslovna okruženja radi rešavanja određenih problema. Suština GIS-a je da prostorne podatke učini upotrebljivim, odnosno da od njih pravi informacije koje pomažu u donošenju odluka.

2.2.1. GIS portal – model

GIS portal za poštanske usluge je web GIS aplikacija namenjena pregledu, analizi i ažuriranju prostornih podataka poštanskih operatora. Baziran je na *ESRI ArcGIS* platformi i prvenstveno je namenjen korišćenju putem interneta. Pozadinske mape koje se mogu koristiti u radu su: ESRI, Open StreetMap ili druge mape koje korisnik kreira.

Portal je sastavljen iz tri različite instance:

1. korisnički interfejs ili javno dostupna instanca (<https://gis.ratel.rs/smartPortal/postanskeUsluge>) – služi za objedinjeni prikaz importovanih prostornih podataka svih poštanskih operatora. Korisnicima je omogućeno pretraživanje prikazanih podataka po različitim vrstama usluga koje se pružaju ili prema drugim kriterijumima kao i pregled svih podataka u odnosu na lokaciju koju korisnik zadaje;
2. instanca namenjena unosu prostornih podataka - pristup imaju samo poštanski operatori koji pristupaju pomoću jedinstvenih pristupnih parametara. Svi podaci koji se prikazuju na ovom delu portala su vidljivi

samo poštanskom operatoru koji ih kreira. Putem ove instance operatori unose svoje podatke i vrše ažuriranje ranije unetih podataka;

3. administratorski deo – služi za administriranje napred navedenih instanci (dodela ovlašćenja i privilegija poštanskim operatorima, podešavanja vezana za slojeve, itd.)

Podaci kojima se opisuju poštanska mreža operatora a samim tim i korisnici informišu o dostupnosti poštanskih usluga su sledeći:

- lokacije poslovnica poštanskih operatora – za pružanje univerzalne poštanske usluge kao i za ekspres i kurirske poštanske usluge;
- lokacije poštanskih sandučića za prijem pisama;
- lokacije paketomata za isporuku pošiljaka;
- teritorija dostave za univerzalnu poštansku uslugu sa prikazivanjem dana u nedelji kada se vrši dostava;
- teritorija dostave za ekspres poštanske usluge – „dostava isti dan”;
- teritorija dostave za ekspres poštanske usluge – „dostava naredni ili određeni dan”;
- teritorija na kojoj se obavljaju kurirske usluge (preuzimanje i dostava pošiljaka).

2.2.2. GIS portal – rezultati i benefiti

Mreža poslovnica i paketomata poštanskih operatora se iz godine u godinu uvećava, pa se pojavila potreba za formiranje jedinstvene baze mreže poštanskih operatora na području Republike Srbije. Na GIS portalu za poštanske usluge, trenutno, se mogu videti lokacije pristupnih tačaka operatora sa najvećim tržišnim učešćem kao i pojedinih operatora kurirskih usluga. Poštanski operatori, koji samostalno unose i ažuriraju podatke na GIS portal, u okviru sloja za prikaz poslovnica, trenutno, prikazuju 1.551 poslovnicu javnog poštanskog operatora kao i 334 poslovnice od ostalih poštanskih operatora. Za svaku lokaciju poslovnice, klikom na simbol ispisuju se detaljnije informacije – tačna adresa poslovnice, vrsta objekta (npr. pošta, poštanski centar, „parcel shop“, „paket shop“, itd.) kao i usluge koje se pružaju (prijem, isporuka, dostava) i dodatne informacije (Slika 3).

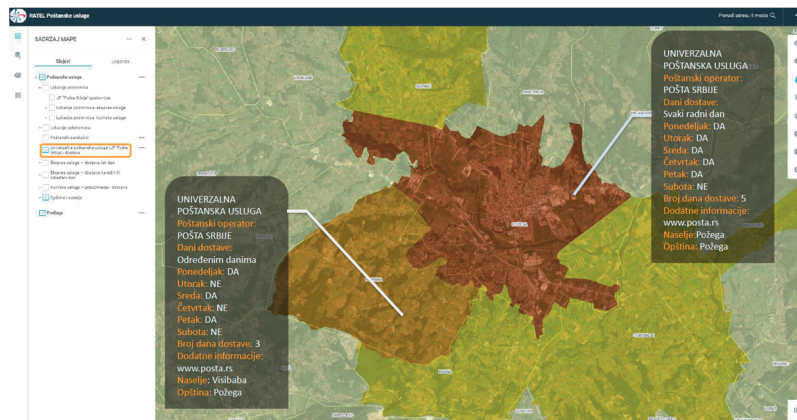


Slika 3: Lokacije poslovnica i paketomata na mapi

Paketomati kao sredstva poštanske mreže, koji prvenstveno služe za uručenje poštanskih pošiljaka, postaju sve više zastupljeni na teritoriji Republike Srbije. Mrežom

paketomata raspolažu tri poštanska operatora (JP „Pošta Srbije“, ANANAS E-COMMERCE, DEXPRESS) i ona ukupno broji 468 paketomata, u ovom trenutku. Pored adrese paketomata, na GIS portalu korisnici dobijaju i informaciju o radnom vremenu paketomata (najveći broj njih je na raspolaganju korisnicima 24h dnevno).

Davalac univerzalne poštanske usluge JP „Pošta Srbije“, po pravilu, univerzalnu poštansku uslugu pruža najmanje pet dana nedeljno, ali u slučaju određenih otežanih okolnosti predviđenih zakonom i podzakonskim aktima, ona se može pružati i manje od pet dana nedeljno. U područjima sa manjom gustinom naseljenosti dostava pošiljaka iz opsega univerzalne poštanske usluge obavlja se određenim danima u nedelji pa je u okviru sloja „Univerzalna poštanska usluga – dostava“ prikazana teritorija Srbije gde je na nivou svakog naselja ili dela naselja definisano kojim danima se ova vrsta dostave vrši (Slika 4).



Slika 4: Pokrivenost teritorije dostavom za univerzalnu poštansku uslugu

Javni poštanski operator, JP „Pošta Srbije“, u sklopu svoje poštanske mreže raspolaže i sa 1.860 poštanskih sandučića čije su lokacije, takođe, prikazane na GIS portalu.

U okviru slojeva, koji prikazuju podatke o teritorijalnoj dostupnosti ostalih poštanskih usluga, prikazana je, najpre, ekspres usluga „dostava – isti dan“. Na GIS portalu se mogu videti područja na kojima je korisnicima dostupna ova vrsta usluge kao i dani kojima se usluga obavlja. Ovu uslugu ne obavljaju svi poštanski operatori (podatke prikazuju JP „Pošta Srbije“ i DEXPRESS) i dostupna je samo na određenim urbanim područjima.

Ekspres uslugu „dostava – naredni ili određeni dan“, kao najrasprostranjeniju uslugu iz domena ostalih poštanskih usluga, obavlja većina poštanskih operatora na tržištu. Najveći broj operatora pokriva celu teritoriju Republike Srbije ovom uslugom, ali na pojedinim područjima, obično ruralnim, dostava se ne vrši svaki radni dan već unapred utvrđenim određenim danima u nedelji. Na GIS portalu se za svakog pojedinačnog operatora može videti kojim danima vrši uslugu na određenoj adresi i na taj način korisnici mogu da izaberu poštanskog operatora koji u pogledu dostave odgovara njihovim potrebama. Pokrivenost dostavom u roku D+1 za ovu vrstu usluge, na osnovu prikazanih podataka na GIS portalu je sledeća:

- AKS EXPRESS – 86% naselja;
- BEXEXPRESS – 100% pokrivenost naselja za rok D+1, ali se za pojedina područja naplaćuje dodatna poštarina zbog otežanog funkcionisanja poštanskog

saobraćaja. Ova područja su posebno označena na GIS portalu i na transparentan način prikazana korisnicima (10% naselja pripada ovoj grupi);

- DEXPRESS – 65% naselja;
- CITY EXPRESS – 95% naselja;
- JP „POŠTA SRBIJE“ – 75% domaćinstava.

Kurirsku poštansku uslugu većina poštanskih operatera, koji poseduju odobrenje za obavljanje ove vrste usluge, obavlja na području glavnog grada, pa se različite zone po svakom operateru mogu videti na teritoriji Beograda.

GIS portal obezbeđuje još jedan benefit za korisnike, da se za unetu adresu prikažu najbliže poslovnice, ili lokacije paketomata, ili da saznaju precizne informacije o poštanskim operaterima koji pružaju usluge na toj adresi i kojim danima se vrši dostava pošiljaka.

U narednom periodu se planira dodavanje dodatnih slojeva sa podacima o gustini naseljenosti teritorije Republike Srbije, čime će se značajno unaprediti prostorna analiza planiranja poštanske mreže.

2.3. Benchmark kvaliteta pošiljaka sa ekspres uslugom

Merenje i analiza kvaliteta ekspres poštanskih usluga predstavlja novinu na tržištu. U cilju definisanja modela, RATEL je u 2022. godini izvršio konsultacije sa svim značajnim učesnicima, kako na tržištu poštanskih usluga Republike Srbije (resorno ministarstvo, poštanski operateri, naučne institucije), tako i na međunarodnom planu (ERGP - European Regulators Group for Postal Services). Kao rezultat su dobijene vrednosti težinskih koeficijenata po inicijalno definisanim kriterijuma koji se koriste u *benchmarku* i višekriterijumskoj analizi kvaliteta prenosa pošiljaka sa ekspres uslugom.

2.3.1. Razvoj modela za benchmark

U periodu od oktobra do decembra 2022. godine, po kreiranom modelu i parametrima, sprovedena su merenja kvaliteta ekspres poštanskih usluga kod 5 poštanskih operatera značajne tržišne snage, pri čemu su korišćena 4 osnovna kriterijuma i 13 odgovarajućih podkriterijuma kojima su dodeljene vrednosti težinskih koeficijenata (Tabela 1).

Merenje parametara kvaliteta obavljanja ekspres usluga u unutrašnjem poštanskom saobraćaju sprovedeno je slanjem 2.010 pošiljaka (402 pošiljke po svakom operateru), kroz prijem i uručenje pošiljaka na 4 regiona, odnosno 13 geografskih oblasti, slanjem i uručenjem pošiljaka između 27 panelista.

Za svaki podkriterijum, u okviru modela za *benchmark*, definisana je skala na osnovu koje je svakoj pošiljci, u toku prenosa, dodeljen određen broj bodova (pozitivnih ili negativnih). Na kraju, na osnovu rezultata („osvojenih” bodova) svih pošiljaka za svaki podkriterijum izračunat je prosečan broj bodova. Na ovaj način dobijene su, kako ukupne srednje vrednosti, tako i srednje vrednosti po svakom operateru na osnovu kojih je izvršen *benchmark*, primenom TOPSIS metode.

Poređenje poštanskih operatera po svakom od kriterijuma i podkriterijuma, kao i finalno poređenje sprovedeno je višekriterijumskom analizom - TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) metodom. Metoda TOPSIS se zasniva na osnovnoj premisi da najbolje rešenje ima najkraću udaljenost od pozitivno-idealnog (najboljeg) rešenja, a najveću udaljenost od negativno-idealnog (najlošijeg) rešenja.

Alternative se rangiraju korišćenjem ukupnog indeksa izračunatog na osnovu udaljenosti od idealnih rešenja.

U Modelu za *benchmark*, tj. pri primeni metode višekriterijumskog odlučivanja – TOPSIS, korišćeni su parametri kvaliteta, kao i vrednosti težinskih koeficijenata datih kroz kriterijume i podkriterijume

Tabela 1: Kriterijumi i podkriterijumi sa težinskim koeficijentima

Naziv kriterijuma kvaliteta i podkriterijuma	Oznaka	Vrednost težinskog koeficijenta
1 Kvalitet u fazi prijema pošiljaka sa ekspres uslugom	Kriterijum K 1	2,3
1.1 Vreme potrebno za uspostavljanje komunikacije sa operatorom <i>Call Centra</i> prilikom zahteva za preuzimanje pošiljke	Podkriterijum P.k 1.1	3,3
1.2 Odstupanje od dogovorenog (najavljenog) vremena za preuzimanje ili od vremena prijema zahteva za preuzimanje pošiljke na adresi pošiljaoca	Podkriterijum P.k 1.2	3,6
1.3 Odbijanje zahteva za preuzimanje ili otkaz primljenog zahteva za preuzimanje pošiljaka	Podkriterijum P.k 1.3	3,1
2 Kvalitet u fazi uručenja na adresi primaoca	Kriterijum K2	3,3
2.1 Dostava u garantovanom roku	Podkriterijum P.k 2.1	3,4
2.2 Postojanje i poštovanje obaveštenja (SMS, mobilna aplikacija i dr.) o okvirnom vremenu uručenja u toku dana (tolerancija ± 120 minuta).	Podkriterijum P.k 2.2	2,3
2.3 Poštovanje dostave na adresi primaoca, odnosno da li je izvršena dostava „do vrata“ primaoca.	Podkriterijum P.k 2.3	2,2
2.4 Mogućnost uručenja na alternativnoj lokaciji (paketomat, nadoslanje na drugu adresu, poslovnica operatora i dr.) na zahtev primaoca	Podkriterijum P.k 2.4	2,1
3 „Reklamacije“ prilikom nezavisnog merenja	Kriterijum K 3	2,4
3.1.Oštećenje pošiljaka (upravljanje lomljivim sadržajem) .	Podkriterijum P.k 3.1	2,7
3.2. Izgubljene pošiljke	Podkriterijum P.k 3.2	2,8
3.3. Neizvršena, nepotpuna ili pogrešno izvršena poštanska usluga	Podkriterijum P.k 3.3	2,2
3.4. Prekoračenje rokova prenoša	Podkriterijum P.k 3.4	2,3
4 Kvalitet IT korisničkog servisa	Kriterijum K4	2,1
4.1. Nesmetano funkcionisanje aplikacije za zahtevanje (naručivanje) preuzimanja pošiljaka na adresi pošiljaoca.	Podkriterijum P.k 4.1	5,2
4.2 Da li je vreme uručenja pošiljaka evidentirano u Track&Trace sistemu ili je pošiljalac na drugi način obavešten o vremenu uručenja (SMS, mail, mobilna aplikacija i sl.) u roku do 60 minuta od vremena uručenja	Podkriterijum P.k 4.2	4,8

Napomena: Zbir koeficijenata u okviru kriterijuma i podkriterijuma je 10

2.3.2. Osnovni elementi plana za merni sistem na osnovu kojeg je vršeno merenje kvaliteta

RATEL je definisao plan merenja u saradnji sa nezavisnom organizacijom koja je merenje sprovela na sledeći način:

- pošiljke za sve poštanske operatore slate su u istom danu, tako da sve pošiljke imaju istog pošiljaoca i istog primaoca,
- panelisti i broj pošiljaka koje su slate u tokove su usklađeni prema broju stanovnika po regionima Beograd, Vojvodina, Šumadija i Zapadna Srbija, Južna i Istočna Srbija, kao i pripadajućim geografskim oblastima,
- zahtev za preuzimanje pošiljke na adresi vršen je putem poziva *Call centra* ili putem aplikacije operatora,
- jedan panelista maksimalno je slao 2 i primao 2 pošiljke nedeljno posredstvom istog operatora,
- u ukupnom broju pošiljaka odnos pošiljaka na dostavi je 75% za urbano područje i 25% za ruralno područje,
- 10% pošiljaka je moralo biti sa lomljivim sadržajem,
- slanje pošiljaka po danima: ponedeljak 25%, utorak 20%, sreda 20%, četvrtak 20%, petak 15%,
- za 5% do 20% pošiljaka trebalo je pokušati preusmerenje na alternativne lokacije, na paketomat, poslovnicu, drugu adresu ili ponovnu dostavu,
- za svaku pošiljku, prema datim kriterijumima su dodeljivani bodovi na osnovu utvrdene skale od 1 do 5. Za određene kriterijume su dodeljivani pozitivni, a za druge su dodeljivani negativni bodovi.

2.3.3. Benchmark ekspres usluga u Republici Srbiji – rezultati i benefiti

Nakon obrade i analize prikupljenih podataka izdvojeni su sledeći rezultati:

- prosečno vreme prenosa ekspres pošiljaka u Srbiji je 1,16 dana;
- prosečno vreme potrebno za uspostavljanje komunikacije sa operatorom *Call Centra*, prilikom zahteva za preuzimanje pošiljke na adresi, je 16 sekundi;
- prosečno vreme od podnošenja zahteva za preuzimanje pošiljaka do dolaska kurira na adresu je 3 sata i 47 minuta;
- 15,57% zahteva za preuzimanje pošiljaka nije realizovano (odbijeno odmah prilikom poziva *Call centra* ili kurir nije došao da preuzme pošiljku);
- 87,29% pošiljaka uručeno u roku od 1 dana;
- 0,18 % pošiljaka je izgubljeno;
- 7,10% pošiljaka nije uručeno na „vratima“ primaoca već najčešće ispred stambene zgrade;
- operatori su u velikom procentu od 83,33% do 100% omogućili usmerenje pošiljaka na alternativnu adresu (paketomat, poslovnicu i dr.) ili ponovnu dostavu, ukoliko primalac nije bio na adresi;
- od dela uzorka poslatih pošiljaka sa lomljivim sadržajem (10%), evidentirane su 4 reklamacije zbog oštećenja, odnosno 1,9% pošiljaka;

- za 28,22% pošiljaka evidentirano je vreme uručenja u roku od 60 minuta na sajtu operatora u delu za praćenje pošiljaka.

Posmatrano po regionima: Beograd, Vojvodina, Šumadija i Zapadna Srbija, Južna i Istočna Srbija, ostvaren je sledeći rezultat:

- najkraće vreme za uspostavljanje komunikacije sa operatorom *Call centra* bilo je u Šumadiji i Zapadnoj Srbiji;
- najkraće vreme od podnošenja zahteva za preuzimanje pošiljaka do dolaska kurira bilo je u Vojvodini;
- najbolji procenat uručenja pošiljaka u definisanom roku evidentiran je u Beogradu i Južnoj i Istočnoj Srbiji;
- najveći procenat dostave pošiljaka na adresi korisnika „do vrata“ stana evidentiran je u Šumadiji i Zapadnoj Srbiji.

U objavljenim rezultatima *benchmarka* koji se nalaze na sajtu RATEL-a³, prikazani su detaljni rezultati po svakom od kriterijuma i podkriterijuma na nivou Republike Srbije, ali i na nivou regiona, u kojima se mogu sagledati parametri kvaliteta po najvećim poštanskim operatorima i uporediti njihovi rezultati. Takođe, poštanski operatori mogu na osnovu prikazanih rezultata da uoče „slabije tačke“ u svom tehnološkom procesu i preduzmu mere za njihovo otklanjanje. Sa druge strane, korisnicima je omogućeno da na osnovu ostvarenih performansi izaberu poštanskog operatora koji zadovoljava njihove potrebe.

Tokom 2023. i 2024. godini nastavlja se trogodišnji ciklus merenja, sa ciljem da se analiziraju promene u rezultatima i utvrđivanja da li su poštanski operatori unapredili tehnološke procese i poboljšali pojedine segmente u prenosu ekspres pošiljaka i time doprineli povećanju konkurentnosti, kao i povećanju kvaliteta ekspres usluga.

3. Zaključak

RATEL podstiče dodatne investicije i dalji razvoj tržišta poštanskih usluga kroz zaštitu konkurentnosti u pružanju usluga, te na pouzdan i nepristrasan način informiše korisnike o kvalitetu poštanskih usluga u Republici Srbiji.

Razvoj navednih modela imao je za cilj da se dodatno podstakne konkurencija između poštanskih operatora poređem ključnih faktora kada je u pitanju izbor poštanskog operatora: cena usluga, kvalitet usluga i kvalitet dostupnosti. Sa jedne strane, poštanski operatori mogu na jednostavan način uporediti svoju ponudu i parametre kvaliteta sa ostalim poštanskim operatorima i unaprediti svoje poslovanje, a sa druge strane, korisnicima poštanskih usluga se omogućava uvid u podatke koji im mogu pomoći u izboru poštanskog operatora na jednostavan i transparentan način.

Takođe, navedene aktivnosti, imaju za cilj da se omogući novim učesnicima na tržištu i malim operatorima veća transparentnost i dostupnost do krajnjeg korisnika.

U segmentu univerzalne poštanske usluge, kao usluge od opšteg interesa, od početka regulisanja tržišta, nema konkurencije i javni poštanski operator jedini obavlja ovu uslugu na teritoriji Republike Srbije. S druge strane, u segmentu ostalih usluga koje skoro

³ <https://www.ratel.rs/cyr/page/cyr-studije-iz-oblasti-postanskih-usluga>

u potpunosti čine ekspres usluge, u kontinuitetu se menja broj operatora, i njihov broj se kreće oko 55 operatora ekspres i kurirskih usluga.

Najveći poštanski operatori, kao dominantniji u pogledu obima i prihoda, imaju svoju poziciju na tržištu, pa se prepoznala potreba da se obezbedi veća vidljivost drugih poštanskih operatora korisnicima usluga kroz opisane modele.

Benchmark ekspres usluga u Republici Srbiji, predstavlja prvu metodologiju za merenje kvaliteta na prostoru Evrope iz oblasti ekspres poštanskih usluga. Merenje kvaliteta ekspres usluga primenom višekriterijumske analize je inovativni doprinos regulatornog delovanja u pogledu podsticanja konkurencije što može da predstavlja polaznu osnovu za razvoj modela za evropsko tržište. Takođe, GIS portal i Portal *ceneuluga.rs* predstavljaju nove modele regulatornog izveštavanja i pogleda na tržište poštanskih usluga, koji mogu poslužiti kao primeri dobre prakse i za druge poštanske regulatore.

Postavke opisanih modela za podsticanje konkurencije su samo jedan aspekt koji će u narednom periodu imati svoje nove funkcionalnosti, a popularizacija ovih modela će biti od značajne važnosti za korisnika, imajući u vidu sve aktuelniji globalni trend rasta daljinske prodaje robe koju poštanski operatori dostavljaju na vrata korisnicima poštanskih usluga.

Literatura

- [1] Strategije razvoja poštanskih usluga u Republici Srbiji za period 2021-2025. godine, „Službeni Glasnik RS“, br. 68/21
- [2] Cowen, D.J, “GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? Photogrammetric Engineering and Remote Sensing”, 54 (11), 1988.
- [3] <https://gis.ratel.rs/smartPortal/postanskeUsluge>, RATEL (2022. godina)
- [4] Izveštaj o sprovedenoj Sektorskoj analizi stanja konkurencije na tržištu ostalih poštanskih usluga (kurirskih službi) u periodu 2019-2021. godina, Komisija za zaštitu konkurencije, <https://kzk.gov.rs/izvestaj-o-sprovedenoj-sektorskoj-an-3>
- [5] <https://www.ceneuluga.rs/index.html>
- [6] Upporedno merenje i analiza (Benchmarking) parametara kvaliteta ostalih poštanskih usluga, dostupno na www.ratel.rs → Regulativa → Studije iz oblasti poštanskih usluga, RATEL (maj, 2023)

Abstract: RATEL has developed three (3) models to enhance competition in the postal services market: The GIS portal for displaying the accessibility quality of postal operators' networks (locations, parcel lockers, delivery areas), The Price Portal for comparing prices of express and courier postal services, and The Model for benchmarking quality parameters of express postal services. The goal of developing these models is to promote competition in the postal services market, improve quality and customer satisfaction.

Keywords: *Postal services, competition, GIS portal, Price portal, benchmark*

MODELS FOR ENHANCING COMPETITION IN THE POSTAL SERVICES MARKET

Dragan Pejović, Ljubomir Ostojić, Sonja Gezović, Mila Milošević

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.007>

MOGUĆNOSTI I IZAZOVI DOSTAVE U ZAVISNOSTI OD TIPa NASELJA

Jelena Milutinović¹, Đorđe Popović²

¹Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, Odsek VŠIKT,
jelena.milutinovic@ict.edu.rs

²Saobraćajni fakultet u Doboju, djdjpopovic1970@gmail.com

Rezime: *U okviru tehnološke faze uručenja/dostave, pružaoci usluga ostvaruju direktan kontakt sa korisnicima i imaju priliku da, kvalitetom svoje usluge, utiču na njihovo zadovoljstvo. Rast e-trgovine direktno utiče na obim pošiljaka, a zatim posredno i na upravljanje resursima i efekte koje oni nose. U zavisnosti od tipa naseljenog mesta (gradska, prigradska i seoska) u kome se vrši dostava, poštanske kompanije imaju različite strategije optimizacije rada i povećanja efikasnosti. U vangradskim oblastima određene usluge nisu dostupne ili su dostupne po nižem kvalitetu nego u urbanim oblastima, tako da stanovnici ovih oblasti obično imaju manje izbora među pružaocima usluga nego gradski stanovnici. U radu je, kroz pregled stručne i naučne literature, predstavljena uporedna analiza specifičnosti organizacije dostave urbanih i ruralnih područja, istaknuti su neki problemi i rešenja i istražena je primenljivost različitih modela u ovim oblastima kojima bi se mogao povećati kvalitet usluge i zadovoljstvo korisnika. Kompleksan odnos međuzavisnosti poštanskog saobraćaja i spoljašnje sredine opisan je uticajnim faktorima i posledicama njihovog delovanja od kojih je jedna od najvažnijih razvoj i održanje lokalne zajednice.*

Ključne reči: *dostava, tipologija naselja, novi poslovni modeli, lokalne zajednice*

1. Uvod

Poštanski sistemi imaju razvijenu infrastrukturu i tradicionalne veze sa lokalnim zajednicama. Institucija pošte je mnogo više od tradicionalnog poslovanja – složene logističke operacije i upravljanje kompleksnom infrastrukturom igraju važnu ulogu u razvoju zajednice i doprinose širem društvenom značaju. Aktuelne promene u okruženju utiču na kreatora poštanske politike, davaoce usluga i korisnike. Transformacija poštanskog sektora uzrokovana je tekućim procesima globalizacije, liberalizacije i korporatizacije, naglim razvojem novih tehnologija i pripadajućih trendova. Ove promene podstiču nove potrebe kupaca, povećanu i promenljivu konkurenciju i razvoj novih poslovnih modela, tako da informacione tehnologije postaju jezgro razvoja poštanske industrije koja vrši sinergiju virtuelnog i fizičkog sveta.

Smanjenje obima pismonosnih pošiljaka i rast obima paketskih pošiljaka trenutno su, i u bliskoj budućnosti, glavni trendovi u poštanskom sektoru i predstavljaju odraz tehnološkog napretka, digitalizacije društva, promena u ponašanju potrošača i preferencije krajnjih korisnika poštanskih usluga što za posledicu ima i promene u organizaciji pojedinih tehnoloških faza, naročito dostave gde iskustvo kupaca – zadovoljstvo, nezadovoljstvo ili nezadovoljstvo pruženom uslugom, može lako da izgradi ili naruši ugled prodavca, ali i davaoca usluge. Na pružaoca usluga utiču brojne varijable - lokacija kupca u odnosu na skladište ili distributivni centar, broj dostava duž rute prevoznika, saobraćaj u tranzitu i dostupnost korisnika, dok kupci mogu biti vođeni mnogim dimenzijama, kao što su različite brzine i modeli dostave, rokovi, opcije vraćanja i pakovanje. Ova tehnološka faza u prenosu pošiljki prolazi kroz određene transformacione procese koji će oblikovati budućnost industrije i definisati nove zahteve korisnika.

U ovom radu kroz pregled stručne i naučne literature, predstavljena je uporedna analiza specifičnosti organizacije dostave u zavisnosti od tipa naselja, istaknuti su neki problemi i rešenja i istražena je primenljivost različitih modela u ovim oblastima kojima bi se mogao povećati kvalitet usluge i zadovoljstvo korisnika.

2. Tehnološka faza uručenja

Proizvodni ciklus u poštanskom saobraćaju se odvija preko četiri međusobno zavisne tehnološke faze koje se sastoje od karakterističnih radnih operacija i to su prijem, prerađiva, prevoz i uručenje.

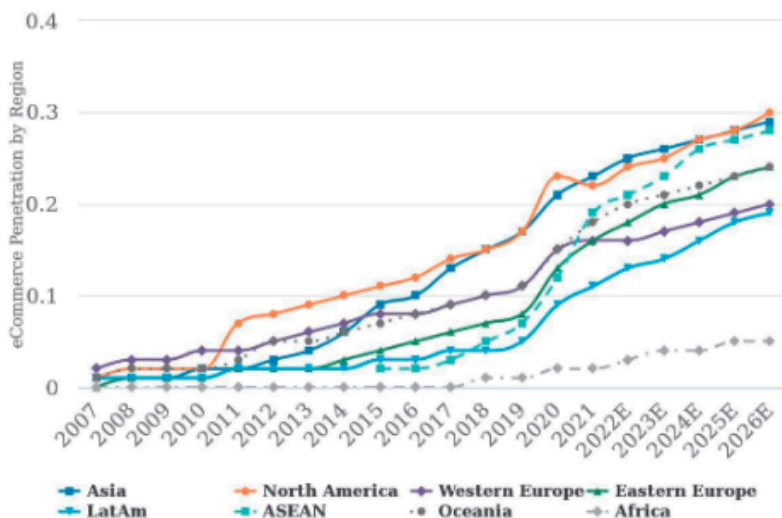
Prijem pošiljaka se može vršiti na šalteru jedinice poštanske mreže (JPM), na adresi koju pošiljalac zahteva (kućna adresa ili službene prostorije) ili putem poštanskih sandučića na način da tokovi pošiljaka moraju biti koordinisani i sinhronizovani čime se garantuje optimalno kretanje pošiljaka bez tehnološkog zastoja i kašnjenja. Prerađiva je tehnološka faza u kojoj se pošiljke prerađuju i usmeravaju ka odredišnoj pošti ili u pravcu odredišne pošte radi uručenja primaocu. Prevoz pošiljaka podrazumeva promenu njihovog mesta korišćenjem adekvatnog prevoznog sredstva - počinje preuzimanjem zaključaka od prijemne pošte i završava se predajom zaključaka odredišnoj pošti gde se pripremaju za uručenje - dostavu ili isporuku.

Uručenje je tehnološka faza koja se odvija između odredišne pošte i primaoca. Ova faza počinje sortiranjem pošiljaka i podelom na dostavne reone, a završava se dostavom (na adresi primaoca, u službenim prostorijama, na stanici poštara, preko kućnih sandučića ili zbirnih poštanskih sandučića, ugovorenih mesta) ili isporukom (u prostorijama pošte – na šalteru, putem poštanskih pregradaka ili posredstvom automata za samousluživanje korisnika).

Troškovi različitih tehnoloških faza prilikom rukovanja pismonosnim i paketskim pošiljkama se razlikuju - u oba slučaja najznačajniji udeo imaju troškovi dostave s tim da oni prilikom prenosa pisama čine 50%, dok su, s druge strane, troškovi transporta značajno viši prilikom prenosa paketa [1].

Faza dostave snosi najveći teret ekspanzije e-trgovine (Slika 1) čiji je ključni pokretač dostupnost digitalne tehnologije. Razvoj digitalizacije je jedan od kritičnih alata i za logističke provajdere i trgovce. Ovo je i prostorno i vremenski najzahtevniji deo logističkog procesa gde poštanski operator direktno komunicira sa korisnikom usluga.

Potrošači zahtevaju mogućnost izbora modela dostave i fleksibilnost i neće oklevati da promene trgovca ako naiđu na nezadovoljavajuće opcije dostave, dok pozitivno



Slika 1. Rast udela e-trgovine kao dela maloprodaje u svim regionima [2]

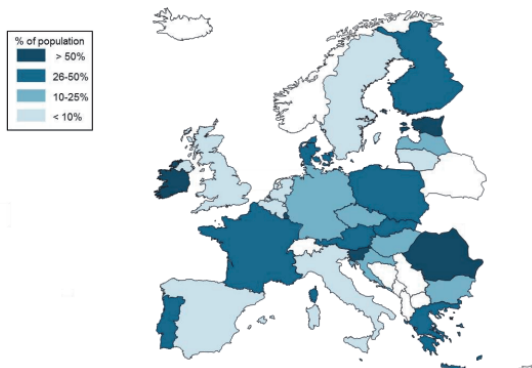
iskustvo dostave vodi dugoročnom zadovoljstvu koje učvršćuje poziciju brenda, podstiče lojalnost i zadržava klijente. Stavljanje potrošača u srž procesa dostave je ključno za logističke kompanije jer se time postiže zadovoljstvo korisnika uslugom, kao i brendova (e-trgovaca) sa kojima rade. Dobra komunikacija sa kupcima, sledljivost pošiljaka i transparentnost u svim fazama prenosa pošiljke značajno utiče na povećanje zadovoljstva kupaca. U suprotnom, današnji umreženi potrošači neće oklevati da izraze svoje razočaranje kada imaju loše iskustvo dostave i da putem društvenih mreža izraze svoje nezadovoljstvo. Kvalitet dostave može „popraviti ili pokvariti” reputaciju brenda, tako da je dostava od ključnog značaja kako za poštanskog operatora, tako i za e-trgovce.

Kupci očekuju brzinu (dostava istog dana više nije samo opcija), blagovremenost, tačnost i preciznost, tako da ceo proces obuhvata širok spektar faktora koji moraju biti sinhronizovani u svakom trenutku da bi se dostava odvijala efikasno. Korisnici kupuju putem mreže tako da trgovci ne mogu da upravljaju korisničkim iskustvom na tradicionalan način. U samom fokusu procesa nije više pošiljalac, već primalac pošiljke. Korisnici žele pozitivno potrošačko iskustvo koje nose iz tradicionalne kupovine sa kvalitetom više - brzinom digitalnog sveta. Sada je logistika sa novim modelima dostave na prvoj liniji korisničkog iskustva, dok su trgovci „невидљиви”.

Poštanski operatori koji žele da napreduju, a ne samo da prežive, moraju da investiraju u tehnologiju koja im omogućava da ponude proizvode tamo gde ih kupci žele i kada ih žele, uz transparentnost u svakoj fazi. Dostava treba da sustigne sve veća očekivanja, i to primenom automatizacije, personalizacije i vidljivosti koje su od strateškog značaja. U međuvremenu poštanski operatori koji se suočavaju sa sve zahtevnijim korisnicima treba da optimizuju ovu najzahtevniju i najskuplju tehnološku fazu implementacijom inovativnih rešenja [3].

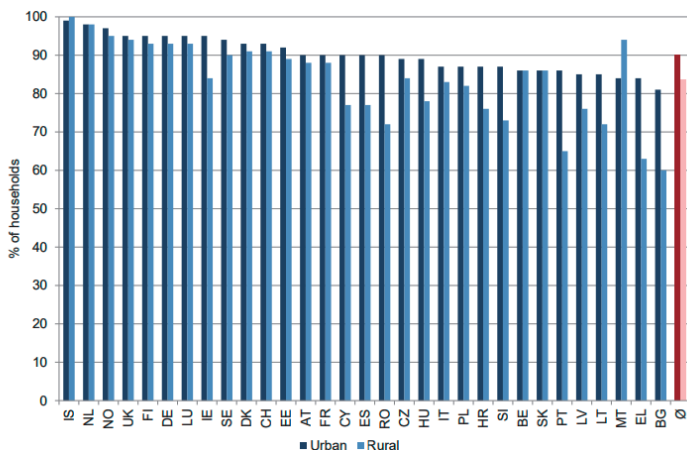
3. Specifičnosti područja u zavisnosti od tipa naselja

Prema podacima Eurostata [4], u 2021. godini 38,9% stanovništva živi u gradovima, u prigradskim naseljima 35,9%, a u ruralnim živi 25,2%. 2017. godine u Estoniji, Irskoj, Sloveniji i Rumuniji više od 50% stanovnika je živelo u ruralnim područjima, dok je u istom periodu u Finskoj, Danskoj, Poljskoj, Češkoj, Slovačkoj, Francuskoj, Portugalu i Grčkoj 25%-50% stanovništva živelo u ovim oblastima (Slika 2).



Slika 2. Procenat ljudi na tlu Evrope koji žive u ruralnim sredinama [5]

U 2016. 75% stanovništva EU-28 koje živi u gradovima, 72% stanovništva predgrađa i 62% stanovništva koje živi u ruralnim područjima je svakodnevno pristupalo internetu. Postoji „digitalni jaz“ između ruralnih i urbanih domaćinstava (u proseku, 85% seoskih domaćinstava ima pristup internetu u poređenju sa 90% urbanih domaćinstava u zemljama uzorka 2018.) (Slika 3). Prema nalazima Zavoda za statistiku RS [6] u gradskim naseljima 2022. godine 87,6% domaćinstava je imalo internet priključak, dok je taj procenat u ostalim naseljima 75,8%. Procenat korisnika interneta koji nikada nisu kupovali/poručivali robu ili usluge putem interneta iznosio je 27,1%.



Slika 3. Digitalna podela između gradskih i seoskih domaćinstava u EU, 2018 [5]

Ova raspodela nije ista u svim zemljama. Zemlje sa najvećim digitalnim jazom su Bugarska, Grčka i Portugalija. Broj pojedinaca koji nikada nisu koristili internet je konstantno u opadanju, ali i dalje nešto iznad 12%. Udeo pojedinaca koji nikada nisu koristili internet je najveći među starijim ljudima i u zemljama poput BG, EL, PT, RO i HR. Prema Eurostat statističkim analizama starost je važan faktor koji opredeljuje razlike u upotrebi interneta, ali značajni faktori su i veštine, niski prihodi i život u ruralnim područjima.

Dostava u gusto naseljenim urbanim jezgrima i slabo naseljenim ruralnim područjima se značajno razlikuju sa izrazitim operativnim, tržišnim i finansijskim izazovima za poštanske službe gde je osnovna razlika gustina tačaka dostave.

Stanovnici udaljenih ruralnih područja mogu se suočiti sa rizikom da im se na kućnoj adresi ne pruža usluga dostave ili da za slanje poštanskih pošiljaka moraju preduzeti dugo putovanje do najbliže JPM koja i ne mora biti tako blizu. Preuzimanje pošiljaka iz paket šopova ili paketomata je alternativno rešenje koje mogu iskoristiti primaoci koji nisu kod kuće u uobičajeno vreme dostave, ali to može stvoriti dodatne troškove putovanja. Nove opcije dostave koje se nude u urbanim sredinama nisu u potpunosti primenljive ili zastupljene u ruralnim i udaljenim područjima. Poštanski operatori mogu uvesti doplate za dostavu u udaljenim područjima gde su troškovi dostave visoki ili bi to mogla biti povoljna poslovna prilika za manje regionalne prevoznike ili konsolidatore.

U gradovima, oblastima visoke gustine, poštanski operatori se suočavaju sa konkurencijom velikih prevoznika, kao i velikim asortimanom regionalnih usluga i start-up-ova zasnovanih na aplikacijama. U gusto naseljenim oblastima poštari imaju operativne izazove uključujući veliki broj stambenih zgrada i potencijalnu krađu paketa što utiče na zamor nosioca, mogućnost nastajanja povreda, ali i na neefikasnost procesa i povećanje troškova.

Kategorija niske gustine obuhvata delove zemlje u kojima se nalaze kuće koje su udaljene jedna od druge i većina zemljišta je poljoprivredno zemljište ili je neizgrađeno. U ovim oblastima poštanska služba ima tradicionalno manju konkurenciju, ali operativni izazovi ostaju. Poštari mogu provesti dosta vremena vozeći se i po zemljanim putevima do najudaljenijih mesta. U zavisnosti od prebivališta ili veličine paketa, od prevoznika će biti zatraženo da prenese paket do ulaznih vrata što može biti potencijalno velika udaljenost na neizvesnom terenu [7].

4. Izazovi ruralne logistike

Iako neki stanovnici gradova nemaju pristup određenim uslugama, većina usluga je dostupna svim građanima bez obzira na platežnu sposobnost, dok u seoskim oblastima, određene usluge nisu dostupne ili su dostupne po znatno višim cenama i/ili nižeg kvaliteta. Poštanski sektor je tradicionalno siguran kanal ekonomske i socijalne inkluzije, tako da, posebno u ruralnim oblastima, logistika može biti sredstvo protiv društvene marginalizacije kojim se stimuliše lokalna ekonomija širenjem baze kupaca lokalnih preduzeća i vrši ušteda novca domaćinstvima nudeći im veći izbor. Oblasti koje bi imale najveću korist od efikasne logistike su one koje imaju tradicionalno najlošije usluge (u proseku, ruralna dostava je 30% skuplja i dostupno je vrlo malo opcija (vremenski termini, mesta za prikupljanje)). Malu gustinu naseljenosti je teško amortizovati, a stanovnicima mogu biti nametnute i doplate za osnovne usluge, što usporava lokalnu ekonomiju. Nekada i država subvencionise lokalne pošte i prodavnice jer lokalna ekonomija sama po sebi nije

dovoljno jaka. Stvara se vrlo malo mogućnosti za trgovinu za preduzeća koja se pod pritiskom neprofitabilnosti iseljavaju pojačavajući ukupni negativni efekat.

Čak i kada je dostava dostupna, lokalna logistika najčešće nije efikasna - velike kompanije mogu da obavljaju dostavu sa gubitkom, ali male prodavnice prehrambenih proizvoda ne mogu. Poznati brendovi ne stvaraju profit kada isporučuju u ruralna područja, ali to rade da ne bi izgubili udeo na tržištu (tj. brendiranje i navike kupaca).

Ruralne tajednice najčešće imaju relativno mali broj stanovnika koji gravitiraju oko najbližeg lokalnog grada gde su prodavnice i javne službe. Davaoci usluge često rade sa nepunim radnim vremenom ili radi određenim danima sa visokim troškovima jer su tačke dostave raspršene i zahtevaju veću potrošnju energenata. Ukoliko dođe do neuspešne dostave, javljaju se i dodatni troškovi povratne logistike i/ili ponovne dostave, dok, u tom slučaju, i korisnik ima dodatne troškove putovanja do najbliže pošte,

Vlasnici preduzeća ograničavaju radno vreme jer baza klijenata nije dovoljno velika, odnosno i relativno velika potražnja na lokalnom nivou je mala. Zavisnost njihovog lanca snabdevanja od efikasnog pružaoca usluge u velikoj meri će uticati na poslovnu politiku i rezultat.

Ruralna područja čine veliko potencijalno potrošačko tržište. Ove zajednice povećavaju svoju kupovnu moć, pa u mnogim zemljama ruralna tržišta rastu brže od urbanih. Osnovni problemi ovih zajednica su loša infrastruktura i pristup uslugama, tako da malo opcija za kupovinu u lokalnim radnjama ove zajednice čini dobrim kandidatima za prihvatanje koncepta e-trgovinu sa većim izborom proizvoda, a stanovnicima pruža uštedu vremena, jednostavnost kupovine i niže troškove transporta jer se smanjuje potreba za putovanjima čiji je primarni cilj kupovina proizvoda. Uključenost u tokove kupovine/prodaje putem mreže može pomoći ruralnim proizvođačima da prevaziđu geografska ograničenja jer nisu više ograničeni na prodaju neposrednom lokalnom tržištu. Lokalni proizvodi i poljoprivredni viškovi iz ruralnih područja nude bogat potencijal za iznošenje na tržište, ne samo najbližih gradova, već i regionalna, nacionalna, pa i tržišta u inostranstvu.

5. Potencijal razvoja elektronske trgovine i posledice

Razvoj elektronske trgovine u ruralnim oblastima smanjuje jaz u prihodima između gradova i sela istovremeno podstičući rast privrede, društvenu stabilnost i ublažavajući neravnotežu regionalnog ekonomskog rasta [8]. U ovom procesu tehnološke inovacije igraju važnu posredničku ulogu kroz izgradnju infrastrukture u nerazvijenim oblastima, podsticanje preduzeća elektronske trgovine da se nasele u ruralnim oblastima, negovanje konkurentnog okruženja, omogućavanje olakšica za uspostavljanje platformi za elektronsku trgovinu u ruralnim oblastima u cilju ekonomskog rasta i postizanja zajedničkog prosperiteta.

Efikasna dostava proizvoda u ruralnim oblastima ima potencijal da utiče na ekonomski napredak seoskih domaćinstava, dok, s druge strane, zbog visokih troškova distribucije, predstavlja izazovnu oblast za davaoce usluga i održivost njihovih poslovnih modela. Zbog specifičnog socio-demografskog i ekonomskog profila ovih oblasti, neophodno je informisati korisnike o mogućim modelima dostave koji su bazirani na izboru i preferencijama korisnika. Starost je varijabla koja razlikuje ispitanike iz ruralnih sredina, dok socijalnoj isključenosti može doprineti nedostatak dostave na kućnu adresu. Sa povećanjem godina starosti opada važnost niže cene dostave i raste nivo poverenja u

nacionalnog operatora. Osnovni motivi za izbor usluge su niža cena, brzina i kredibilitet, ali su preferencije korisnika, bez obzira na kriterijum izbora modela dostave, fokusirane na ekološki prihvatljivije [9]. Očekivani efekat poboljšanja životne sredine koji se očekuje od uvođenja korišćenja dronova u dostavi u ruralnim područjima je 13 puta veći nego u urbanom području [10].

Podrazumevana usluga dostave istog ili sledećeg dana karakteristična za urbana područja, sada za logističke provajdere postaje zahtevna prilikom pružanja usluge u seoskim ili prigradskim oblastima. Ustaljena praksa pružanja usluge u gradovima nije primenljiva na ruralne oblasti jer postoji ograničeno znanje o kupovnim navikama ruralnih stanovnika i primenljivosti poznatih principa segmentacije tržišta koji utiču na zadovoljstvo i lojalnost kupaca jer e-potrošači iz različitih tipova naselja verovatno imaju različite potrebe i očekivanja. Nedostatak znanja o disproporciji zahteva i perspektive e-potrošača gde je kriterijum tip naselja predstavlja veliki jaz u prilagođavanju nivou usluge: loše razumevanje zahteva dovodi do toga da e-prodavci nude istu uslugu potrošačima iz različitih područja, uzrokujući da i pružaoci usluga dostave dožive disbalans opterećenja i troškova kada opslužuju različita naselja, što rezultira većim troškovima za neke operacije i negativnim uticajem na iskustvo i zadovoljstvo potrošača. Hipoteza da je više opcija dostave povezano sa zadovoljstvom kupaca i ponovljenom kupovinom za korisnike iz urbanih naselja nije primenljiva na seoske stanovnike. Rezultati ankete [11] pokazuju kako postojanje jedne opcije dostave ne ugrožava zadovoljstvo i lojalnost seoskih potrošača koji su koristili odgovarajuću uslugu.

Studija [12] definiše dva mesta preuzimanja van kuće – pick-up point (PP) i paketomate. Snaga oba sistema je fleksibilnost radnog vremena. Primer Francuske razmatran u ovom radu pokazuje da PP mreže omogućavaju prelazak sa B2C isporuka na jeftinije B2B isporuke smanjujući rizik neuspešnih dostava i omogućavajući konsolidaciju pošiljaka. Sa druge strane, one stvaraju nove vrste B2B putovanja koja nisu u obrascima urbanih modela kretanja. Potencijalni dobitak (smanjeni ukupni pređeni put vozila za kućnu dostavu) može biti izgubljen zbog povećanog broja privatnih putovanja, posebno kada se ova usluga pruža stanovnicima prigradskih i ruralnih područja.

Studija [13] razmatra uticaj na životnu sredinu u zavisnosti od modela dostave iz perspektive platforme za e-trgovinu koja prodaje neprehrambene maloprodajne proizvode u Belgiji. Za ruralna područja, dostava na kućnu adresu putem dobro uspostavljene logistike je održiviji koncept od modela dostave do mesta prikupljanja i pripadajućih povezanih putovanja potrošača. Slično je i za prigradska naselja. Rezultati ukazuju da različiti tipovi područja preferiraju različite modele dostave, tako da i javni i privatni operatori treba da razmotre tip oblasti u kojoj posluju i prilagode svoje poslovne modele. Ograničen broj opcija poslednje milje je poželjniji da bi se poboljšala konsolidacija i usmerili kupci u najodrživijem pravcu u ruralnim oblastima. Lokalne samouprave i kompanije koje posluju u gradovima treba da se usmere na rešenja sa lako dostupnim sabirnim mestima i izbegavaju dostavu na adresi. Država može uticati promovisanjem korišćenja održivih vidova transporta, a potrošači se mogu motivisati (uglavnom putem cene ili nefinansijskim podsticajima) ka održivijim opcijama poslednje milje.

U pogledu brzine, kvaliteta usluge, pogodnosti i pouzdanosti dolazi do rastuće sličnosti (konvergencije) dostave za fizička i pravna lica. Sa smanjenjem ovih razlika operatori moraju da prilagode postojeće i obezbede nove poslovne modele i usluge kako bi uspešno isporučili robu za svakog korisnika sa istim nivoom kvaliteta [14].

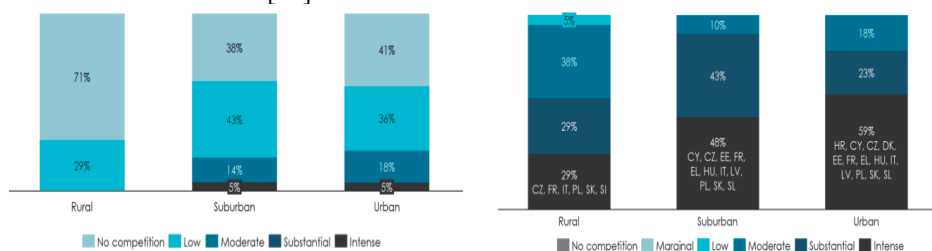
Nejednakost ponude namirnica u zavisnosti od tipa naselja u fizičkoj maloprodaji (mali broj, loša ponuda, povlačenje zbog neisplativosti) projektuje se i na onlajn ponudu. Tradicionalna interakcija između trgovaca i potrošača u kojoj korisnik putuje do prodavnice se menja. Kupovina na mreži prebacuje troškove poslednje milje sa potrošača na prodavca, tako da se prodavci orijentišu ka područjima koja sadrže dovoljnu potražnju potrošača kako bi investicija bila održiva. Autori [15] nude rešenja kroz konsolidaciju više trgovaca od strane jednog ili treće strane ili crowdshipping koncept uz razmatranje potencijalnih problema sa pouzdanošću dostave ili krađe.

Kontinuirana zavisnost velikih korisnika od tradicionalnih poštanskih modela koji su zastareli u sadašnjem poslovnom okruženju smatra se jednim od izazova efikasnog rada [16]. Shodno tome, pošte u državnom vlasništvu su gubile klijente i uspostavljene poslovne segmente zbog privatnih konkurenata koji se lako prilagođavaju i brzo ugrađuju nove trendove u svoje poslovne modele. Komparativna prednost može, međutim, biti povezana sa manjim obimima privatnih operatora u poređenju sa javnim operatorom poštanskih usluga. Postojeći konvencionalni model dostave neće se efikasno uklapati u buduću dinamiku, tako da ga je potrebno revidirati na način da poštanski operatori treba da budu inovativni i proaktivni, a ne reaktivni. Pošta mora da osvoji poverenje svojih klijenata poboljšanjem usluga i uspostavljanjem efikasne komunikacije koristeći i postojeće tehnološke infrastrukture kao što su društvene mreže, SMS, e-pošta...

Kao što je dato na Slici 4, što se tiče konkurencije u različitim tipovima naselja vezano za pismonosne pošiljke, nacionalne regulatorne agencije (NRA) uglavnom kategoriju konkurenciju kao nisku u svim geografskim oblastima. Međutim, u poređenju sa većinom ruralnih područja, ipak je veća konkurencija u prigradskim i urbanim sredinama sa malom razlikom u nivoima konkurencije. Ovi nalazi nisu iznenađujući, s obzirom na veće troškove dostave pisama u ruralnim područjima u poređenju sa gušće naseljenim urbanim područjima. Generalno, NRA izveštavaju da operatori koji ulaze na tržište pismonosnih pošiljaka opslužuje veoma mali deo stanovništva, posebno fokusirajući se na specifične regione i urbana područja.

U poređenju sa segmentom dostave pismonosnih pošiljaka, za koji je većina NRA procenila nivo konkurencije kao sličan u urbanim i prigradskim naseljima, urbana područja izgledaju još privlačnija za alternativne pružaoce usluga dostave paketa i češće su podložni intenzivnoj konkurenciji.

Što se tiče nivoa konkurencije u svim tehnološkim fazama prenosa pošiljaka, nacionalne regulatorne agencije širom EU generalno navode da se konkurencija može okarakterisati kao značajna i intenzivna u celom lancu vrednosti, ali kao posebno intenzivna u fazi dostave [17].



Slika 4. Procena udela konkurencije na tržištu pismonosnih (levo) i paketskih pošiljaka (desno) u zavisnosti od tipa naselja [17]

6. Crowdfunding koncept

Potencijalno rešenje, zasnovano na principima održivog razvoja, koje bi u budućnosti imalo uticaj na privredu i životnu sredinu je crowdfunding (CSH). CSH je trend u nastajanju/razvoju u urbanim sredinama koji omogućava organizacijama da se udruže sa regionalnim stanovnicima kako bi izvršili dostavu do krajnjeg korisnika na način da se iskoriste neiskorišćeni kapaciteti privatnih i javnih vozila koja su već na transportnoj mreži kroz integraciju putničkog i teretnog saobraćaja. CSH utiče na transportni sistem kroz moguće promene udela različitih vidova saobraćaja u ukupnom kretanju, odakle se može utvrditi potencijalni društveni uticaj – na zdravlje ili životnu sredinu. Na ovaj način se koriste neiskorišćeni logistički kapaciteti motorizovanih učesnika u saobraćaju, ali i korisnika javnog prevoza i biciklista/pešaka.

Ovaj koncept može biti integrisan sa mikročvorištima, mobilnim depoima, sa konceptom „portering”, kupcima u prodavnicama, saradnjom sa javnim ustanovama, društvenom trgovinom, korišćenjem društvenih mreža... Pored sopstvenih prevoznih sredstava, dostavljači u CSH-u mogu koristiti i javni prevoz [18]. Korišćenjem CSH ostvaruje se ekološki održivo ponašanje i zadovoljava potreba za ostvarenjem altruistički i društveno orijentisanih vrednosti, umesto fokusiranjem na ekonomske podsticaje. Ovaj princip uključuje iskustvo pozitivnih emocija izazvanih životom u skladu sa sopstvenim i tuđim idealima – „činjenjem dobra“ i osećaja pripadnosti društvenoj grupi koja deli te vrednosti. Najveći potencijalni uticaj ove inovativne usluge povezan je sa e-trgovinom i dostavom hrane/namirnica.

Ovaj koncept se može primeniti nezavisno od područja, ali se primarno, razvija u urbanim sredinama iz više razloga: dostupnost IKT tehnologija, veća gustina naseljenosti, samim tim i gustina potencijalnih pružalaca i korisnika usluga gde se kao posledica javljaju znatno masovniji i intenzivniji tokovi [19]. Ipak, i domaćinstva u ruralnim područjima realizuju određene tokove, prilikom čije realizacije se može koristiti CSH i rešiti neke od problema klasične dostave kao što su visoki troškovi, mala gustina naseljenosti, lošija usluga.

Konačni rezultati studije [20] ukazuju da se troškovi transporta i dužina predenog puta primenom CSH mogu smanjiti za 23,85% i 37,38% respektivno, u poređenju sa konvencionalnom ruralnom logistikom. Osim toga, analiza ukazuje da, pod određenim uslovima, CSH pristup može biti ekonomski konkurentan i uticati na otklanjanje problema dostave u ruralnim regionima efikasnom integracijom kretanja običnih ljudi i ruta dostave, dok obuhvata složenost postojećih problema kao što su ograničenja kapaciteta vozila, spremnost potencijalnih davaoca usluge za dostavu i vremenske rokove.

Ukoliko se uporedi primena CSH u gradskim i prigradskim naseljima, gustina naseljenosti područja, raspodela prihoda i posedovanje vozila u domaćinstvu imaju mnogo izraženiji uticaj na performanse transporta u urbanim sredinama. Mogućnost privlačenja potencijalnih nosilaca pošiljaka se povećava sa veličinom pošiljke, a opada sa skraćanjem rokova dostave. Status pošiljaoca, pravnog lica, u B2C modelu je značajno veći faktor u prigradskim naseljima. Za pošiljke u prigradskim oblastima svaka dodatna milja dostave ima izraženi negativni efekat. Pozitivno prethodno iskustvo je značajnije u prigradskim oblastima [21].

COVID-19 je pogoršao prostorno isključenje ljudi koji žive u ruralnim područjima što je dovelo do većeg interesovanja za onlajn kupovinom među ovom društvenom grupom, i uticalo na promene njihovih preferencija za izbor načina dostave

robe kupljene putem interneta. Istraživanje [22] pokazuje da više od 60% ispitanika koji žive u ruralnim područjima naručuje kupljenu robu onlajn sa modelom kućne dostave. Oko 22% anketiranih nakon pandemije počelo je češće da se opredeljuje za dostavu na paketomatima.

Gustina stanovništva, kupovna moć i obrazovni nivo je, statistički, niži u ruralnim oblastima, dok su rastojanja korisnika od skladišta e-trgovaca mnogo veća. U istraživanju [23] je ukupan broj kupovina bio znatno manji u ruralnim oblastima, ali sa ubedljivo većim procentualnim rastom u posmatranom periodu. Sezonski pikovi su potpuno različiti za ove dve kategorije stanovništva (ruralno i urbano). Seosko stanovništvo u proseku naručuje manje artikala, manji broj artikala kvarljive robe i više naručuje kabaste stvari. Očekivano prosečno vreme dostave je za oko 73% veće u ruralnim oblastima, tako da se, sa strane davaoca usluge, jednostavnije može organizovati i ne podleže dodatnim izazovima ispunjenja zahteva dostave istog dana. Osnovne preporuke prema rezultatima istraživanja jesu da se dostava proizvoda naručenih online u selima može poboljšati prilagođavanjem asortimana proizvoda, planiranjem nivoa usluga dostave, uvođenjem dodatnih naknada za proizvode kojima se povećavaju troškovi trgovca, formiranjem transparentne ponude za korisnike u zavisnosti od naselja, rekonfiguracijom prodajne mreže/skladišta i planiranjem transportne politike.

7. Zaključak

Karakteristike korisnika se razlikuju u nizu socioekonomskih i demografskih karakteristika koje utiču na njihove preferencije kupovine i ekonomiju dostave, tako da strategije dostave u selima ne mogu biti jednostavna replikacija usluga koje se koriste za opsluživanje urbanih tržišta [24]. Iz tog razloga se javlja potreba za novim održivim modelima dostave koji donose ekonomske, ekološke i socijalne dobrobiti ovim specifičnim zajednicama i obezbeđuju pristup društvenim resursima, institucijama i procesima, sa posebnim fokusom na ugrožene pojedince. Specifične karakteristike područja u zavisnosti od tipa naselja i analiza postojećih modela dostave uz značajan rast pokrivenosti internetom i razvoj e-trgovine, trebalo bi da budu početna osnova za razvoj neophodne infrastrukture i novih poslovnih modela koji bi trebalo da zadovolje postojeće korisnike, ali i usmeravaju buduće zahteve ka adekvatnim odgovorima sektora.

Literatura

- [1] NERA, (2004), Economics of Postal Services: Final Report: Appendices, A Report To The European Commission Dg-Markt, July 2004 London
- [2] Euromonitor, National Data Sources, Morgan Stanley Research estimates <https://www.morganstanley.com/ideas/global-ecommerce-growth-forecast-2022>, pristupljeno 20.10.2023.
- [3] <https://onfleet.com/blog/what-is-last-mile-delivery/> pristupljeno 18.10.2023.
- [4] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Urban-rural_Europe_-_introduction#Area_and_population Eurostat, JRC and European Commission Directorate-General for Regional Policy pristupljeno 23.10.2023.
- [5] Dieke, A. K., Hillebrand, A., Thiele, S., Bender, C., Kroon, P., Niederprüm, A., ... & Taş, S. (2021). *User needs in the postal sector and evaluation of the regulatory framework*. Publications Office of the European Union.
- [6] Republički zavod za statistiku. (2022). *Upotreba informaciono-komunikacionih tehnologija u Republici Srbiji*. Beograd, 2022.

- [7] Office of Inspector General, United States Postal Service RISC Report Package Delivery in Rural and Dense Urban Areas Report Number RISC-WP-20-008 | September 16, 2020.
- [8] Wang, D. (2023). Has electronic commerce growth narrowed the urban–rural income gap? The intermediary effect of the technological innovation. *Sustainability*, 15(8), 6339.
- [9] Markowska, M., & Marcinkowski, J. (2022). Rural E-Customers' Preferences for Last Mile Delivery: Evidence from Poland. *Energies*, 15(22), 8351.
- [10] Park, J., Kim, S., & Suh, K. (2018). A comparative analysis of the environmental benefits of drone-based delivery services in urban and rural areas. *Sustainability*, 10(3), 888.
- [11] Vakulenko, Y., Arsenovic, J., Hellström, D., & Shams, P. (2022). Does delivery service differentiation matter? Comparing rural to urban e-consumer satisfaction and retention. *Journal of Business Research*, 142, 476-484.
- [12] Morganti, E., Dablanc, L., & Fortin, F. (2014). Final deliveries for online shopping: The deployment of pickup point networks in urban and suburban areas. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 23-31.
- [13] Mommens, K., Rai, H. B., Van Lier, T., & Macharis, C. (2021). Delivery to homes or collection points? A sustainability analysis for urban, urbanised and rural areas in Belgium. *Journal of Transport Geography*, 94, 103095.
- [14] Ducret, R. (2014). Parcel deliveries and urban logistics: Changes and challenges in the courier express and parcel sector in Europe—The French case. *Research in Transportation Business & Management*, 11, 15-22.
- [15] Newing, A., Hood, N., Videira, F., & Lewis, J. (2022). 'Sorry we do not deliver to your area': geographical inequalities in online groceries provision. *The International Review of Retail, Distribution and Consumer Research*, 32(1), 80-99.
- [16] Opeyeolu Timothy Laseinde & Khumbulani Mpofo (2017): Providing solution to last mile challenges in postal operations, International Journal of Logistics Research and Applications, DOI: 10.1080/13675567.2017.1288712
- [17] Copenhagen Economics, European Commission, (2022). Main developments in the postal sector (2017-2021) Volume 1, Study for the European Commission Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, European Commission, Brussels
- [18] Milutinović, J., Veličković, S., Grgurović, B., Radosavljević, S. (2023) The role of crowdshipping in sustainable city logistics, International Conference on Advances in Traffic and Communication Technologies – ATCT 2023, Faculty of Traffic and Communication, May 11. & 12., 2023, Sarajevo
- [19] Jana, C., Dobrodolac, M., Simic, V., Pal, M., Sarkar, B., Stević, Ž. (2023). Evaluation of sustainable strategies for urban parcel delivery: Linguistic q-rung orthopair fuzzy Choquet integral approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, Part C, 106811. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106811
- [20] Zhang, Q., Li, Y., & Cai, Q. (2021). Investigation on the Last-Mile Delivery of Rural Logistics under Crowdsourcing Transportation in China. *International Journal for Traffic & Transport Engineering*, 11(1).
- [21] Ermagun, A., Shamshiripour, A., & Stathopoulos, A. (2020). Performance analysis of crowdshipping in urban and suburban areas. *Transportation*, 47, 1955-1985.
- [22] Markowska, M., Marcinkowski, J., Kiba-Janiak, M., & Strahl, D. (2023). Rural E-Customers' Preferences for Last Mile Delivery and Products Purchased via the Internet before and after the COVID-19 Pandemic. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 18(1), 597-614.
- [23] Sousa, R., Horta, C., Ribeiro, R., & Rabinovich, E. (2020). How to serve online consumers in rural markets: Evidence-based recommendations. *Business Horizons*, 63(3), 351-362.
- [24] Milutinović, J., Marković, D., Stanivuković, B., Švadlenka, L., Dobrodolac, M. (2020). A model for public postal network reorganization based on DEA and fuzzy approach. *Transport* 35(4), 401-418. DOI: 10.3846/transport.2020.13741

Abstract: *Within the technological phase of service/delivery, service providers make direct contact with users and have the opportunity to influence their satisfaction with the quality of their services. The growth of e-commerce directly affects the volume of shipments, and then indirectly the management of resources and the effects they carry. Depending on the type of settlement (urban, suburban and rural) in which delivery is made, postal companies have different strategies for optimizing work and increasing efficiency. In non-urban areas, certain services are not available or are available at a lower quality than in urban areas, so residents of these areas tend to have less choice among service providers than urban residents. In the paper, through a review of professional and scientific literature, a comparative analysis of the specifics of the delivery organization of urban and rural areas is presented, some problems and solutions are highlighted, and the application of different models in these areas that could increase the quality of services and user satisfaction is investigated. The complex interdependence of postal traffic and the external environment is described by the influencing factors and consequences of their action, one of the most important of which is the development and maintenance of the local community.*

Keywords: *delivery, settlement typology, new business models, local communities*

DELIVERY OPPORTUNITIES AND CHALLENGES DEPENDING ON THE TYPE OF SETTLEMENT

Jelena Milutinović, Đorđe Popović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.008>

ANALIZA PERFORMANSI CEP OPERATORA SA ASPEKATA ODRŽIVOSTI

Nataša Čačić¹, Dragana Šarac¹, Bojan Jovanović¹, Estera Rakić²

¹ Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Trg Dositeja Obradovića 6,
21102 Novi Sad, ncacic@uns.ac.rs, dsarac@uns.ac.rs, bojanjov@uns.ac.rs

² Fakultet za saobraćaj, komunikacije i logistiku Budva, estera_rakic@hotmail.com

Rezime: Globalni porast broja paketskih i ekspres pošiljaka ima značajan uticaj na karbonski otisak koji stvaraju poštanski operatori prilikom dostave robe jer prenos paketa zahteva znatno više logističkih i transportnih kapaciteta nego što je to slučaj kod prenosa pisama. Ova situacija predstavlja pravi izazov za poštanske operatore da smanje svoj karbonski otisak. Svetski poštanski savez kao specijalizovana agencija Ujedinjenih Nacija, je posvećen radu ka postizanju ciljeva Agende održivog razvoja 2030.

Poštanski sektor može imati ključnu ulogu u postizanju ciljeva održivog razvoja kako na nacionalnom tako na regionalnom i međunarodnom nivou. U okviru ovog rada data je TOPSIS analiza parametara održivog razvoja izabranih CEP operatora koji svoje poslovanje realizuju na teritoriji Republike Srbije. Nakon izvršene TOPSIS analize, urađen je i proračun emisije CO₂ vozila JP Pošte Srbije, na teritoriji grada Beograda na osnovu čega su procenjene i moguće potencijalne uštede operatora.

Ključne reči: *poštanski operatori, održivost, CEP, TOPSIS, emisija CO₂*

1. Uvod

Svako poštansko preduzeće bilo da se radi o privatnom ili javnom poštanskom operatoru svoje poslovanje zasniva na određenoj teritoriji koja može obuhvatati deo određenog grada, celu teritoriju grada, države ili regiona. U poštanskom sistemu skoro svako naseljeno mesto na planeti je pokriveno sa uslugama najmanje jednog operatora. Prema tome, poštanski sistem je jedan od najvećih poslovnih sistema koji postoje sa široko rasprostranjenim jedinicama poštanske mreže i razvijenom infrastrukturom.

Sektor transporta odgovoran je za 25% ukupne emisije gasova staklene bašte (eng. greenhouse gas). Po kategorijama transporta, drumski saobraćaj učestvuje sa skoro 95% emisija CO₂ [1]. Funkcionisanje ovakvog sistema ima značajan uticaj na životnu sredinu.

Nedavno predloženim zakonom postavljeni su ciljevi smanjenja emisije CO₂ koji potiče iz automobila za čak 55% i kombi vozila za 50% do 2030. godine u poređenju sa

1990. godinom. U 2021. godini došlo je do značajnog povećanja upotrebe električnih automobila i kombi vozila u EU-27 [2]. Svetski poštanski savez (SPS) je čak 1994. godine pokrenuo Program zaštite životne sredine, tako što su osnovali radnu grupu koja se bavi ekološkim problemima. Kako bi se postigli ciljevi održivosti neophodno je preduzeti ekonomske, društvene i ekološke akcije na svim nivoima poštanskog poslovanja uz konstantnu edukaciju i promovisanje svesti o održivom razvoju. Poštanski operatori su prvi put 2008. godine od strane Svetskog poštanskog saveza dobili upit o emisiji štetnih gasova (eng. greenhouse gas emissions).

Cilj ovog rada je da se predstave ciljevi i aktivnosti usmerene ka održivom poslovanju u poštanskom saobraćaju. U okviru rada data je TOPSIS analiza parametara održivog razvoja izabranih CEP operatora koji svoje poslovanje realizuju na teritoriji Republike Srbije. Nakon izvršene TOPSIS analize, urađen je i proračun emisije CO₂ vozila JP Pošte Srbije na teritoriji grada Beograda, na osnovu čega su procenjene i potencijalne uštede poštanskog operatora.

2. Koncept održivog razvoja u poštanskom saobraćaju

Održivi razvoj je suštinski element poštanskog poslovanja. Održivi razvoj doprinosi poboljšanju poslovne efikasnosti i otpornosti, jačanju odnosa sa korisnicima i razvoju novih tržišta. Osim toga, odgovorno poslovanje omogućava poštanskim operatorima da kreiraju atraktivna i bezbedna radna mesta, grade poverenje u društvu kao i da iskoriste svoju mrežu za dobrobit opšte zajednice. SPS podržava sve poštanske operatore koji teže realizaciji ciljeva održivog razvoja u segmentu sva tri stuba održivosti [3]:

- **Ekonomski;** SPS pruža podršku poštanskim operatorima kroz programe finansijske inkluzije u povećanju kvaliteta usluga, proširenju kapaciteta, kako bi omogućili pristup finansijskim uslugama neobuhvaćenoj grupi korisnika.
- **Ekološki;** Ovaj stub održivosti podrazumeva praćenje emisije gasova staklene bašte koji proističu kao rezultat realizacije poštanskih aktivnosti. Ovo praćenje omogućava poštanskim operatorima da analiziraju i adresiraju emisije gasova koje se odnose na njihovu delatnost poslovanja. SPS nastoji da deli znanja i prenosi iskustva iz prakse o korišćenju prirodnih resursa i obnovljive energije. SPS teži uspostavljanju doprinosa globalnoj Agendi održivosti.
- **Društveni;** Podrazumeva korišćenje poštanskih kanala radi podizanja svesti o društvenim i zdravstvenim pitanjima, doprinositi borbi protiv diskriminacije i isključenosti stanovništva, promovisanje različitosti i profesionalne rodne ravnopravnosti, itd.

2.1 Ekonomska održivost

Poštanski sektori širom Sveta igra važnu ulogu u pružanju i obezbeđivanju pristupačnih finansijskih uluga posebno za ljude koji su često isključeni poput stanovništva sa niskim prihodima, žene, mladi ljudi i ljudi iz ruralnih sredina. Ove finansijske usluge podrazumevanju bankovne račune, plaćanja, sigurni transfer novca i kredite. Program finansijske inkluzije SPS podrazumeva istraživanje i tehničku pomoć dostupnim poštanskim operaterima, podržavajući ih u pružanju relevantnijih, efikasnijih i efektivnijih

finansijskih usluga za isključeno stanovništvo i MSME (mikro mala i srednja preduzeća)[3].

2.2 Ekološka održivost

Poštanski operatori zemalja članica SPS imaju značajan uticaj na životnu sredinu sa više od million vozila i oko 800.000 zgrada. Poštanski operatori imaju najnapredniju transportnu mrežu na Svetu putem koje svakodnevno dolaze do velikog broja korisnika. Poštanski operatori su na nacionalnom nivou vlasnici najvećih vozničkih parkova i kao takvi predstavljaju moćan segment u realizaciji promena. Mnogi poštanski operatori su zabeležili značajne rezultate u implementaciji održivih rešenja u praksi. Sa porastom e-trgovine, sve je veća potreba korisnika za održivim proizvodima i uslugama [3].

2.3 Društvena održivost

Poštanski sektor je sa više od 5 miliona zaposlenih širom sveta najveći poslodavac. SPS podržava poštanske operatore zemalja članica u njihovim naporima da obezbede fer, bezbedna i atraktivna radna mesta bez diskriminacije. U novembru 2019. godine SPS je pokrenuo projekat promovisanja i boljeg razumevanje pružanja socijalnih usluga za dobrobit društva putem kanala pošte [3].

Između 2012.-2022. godine poštanski operatori su udvostručili udeo vozila na alternativna goriva (sa 12% na 26%). Globalno gledano, električna vozila sada čine 20% poštanskog voznog parka. Prioritet u smanjenju emisije štetnih gasova dugo je bila dostava, dok se sada fokus pomera ka transportu na velikim udaljenostima i samoprodukciji električne energije. Poštanski operatori ulažu velike napore da uštede energiju i dodatno smanje svoju zavisnost od fosilnih goriva. U 2022. godini, 38% električne energije koju koriste poštanski operatori u svojim objektima dolaze iz obnovljivih izvora. Poštanski operatori teže da koriste energiju koju sami stvaraju. Poštanski sektor teži da proizvede sopstvenu energiju koju bi koristio za napajanje svojih električnih vozila [4].

Svetski poštanski savez (SPS) kao specijalizovana agencija Ujedinjenih Nacija (UN), je posvećen radu ka postizanju ciljeva Agende održivog razvoja 2030. 17 Ciljeva održivog razvoja koje su UN usvojile u septembru 2015. godine služe kao putokazi u međunarodnoj saradnji radi izgradnje održive budućnosti i podsticanja napretka i dobrobiti društva. Poštanski sektor može imati ključnu ulogu u postizanju ciljeva održivog razvoja kako na nacionalnom tako na regionalnom i međunarodnom nivou. Široko rasprostranjena poštanska mreža čini ovu delatnost jednom od strateških pokretača programa za dostizanje ciljeva održivog razvoja UN. Veliki broj poštanskih operatera je shodno Agendi primenilo mere za smanjenje karbonskog otiska u svom poslovanju koristeći obnovljive izvore energije, optimizujući rute kretanja dostavljača na reonima kao i kreiranjem ekološki prihvatljive ambalaže koja se može više puta koristiti. Kako su klimatske promene sve očiglednije, SPS posebni akcenat u svom poslovanju stavlja na smanjenje emisije štetnih gasova, kroz razvoj različitih alternativnih (ekološki prihvatljivijih) rešenja za transport pošiljaka, teži primeni različitih softverskih rešenja kao što je OSCAR platforma koja se koristi za analizu i izveštavanje o emisiji štetnih gasova [5]. OSCAR rešenje je usklađen sa ISO 14001 i globalnom inicijativom za izveštavanje. Napravljen je po meri za poštanski sektor i uzima u obzir izazove i zahteve specifične za ovu granu industrije. Ovo rešenje je

razvijeno po inicijativi zemalja članica SPS, nakon odluke na 25. Kongresu SPS u Dohi (rezolucija C66/2012)[3]. Savet za poštansku operativu (eng. postal operations council) će prema poslovnom planu SPS-a u periodu od 2022.-2025. godine proučavati gasove staklene bašte koje emituje poštanski sektor, kao i mere za ublažavanje i prilagođavanje [6].

3. Koncept održivosti poštanskog sektora iz ugla Post Europe-a

Post Europe i njegove članice stavljaju aspekt održivosti u srž svog delovanja i u potpunosti su usklađeni sa ciljevima EU o postizanju značajnog smanjenja emisije gasova staklene bašte do 2030. godine, kao i da postanu klimatski neutralne do sredine veka, sa naglaskom na smanjenje emisije koje stvaraju zgrade i transportne aktivnosti. Post Europe navodi da je postizanje klimatske neutralnosti i smanjenje emisije gasova staklene bašte njihov prioritet. Većina poštanskih operatora već ima postavljene ciljeve smanjenja emisije gasova staklene bašte. Neki operatori su već CO₂ neutralni, dok drugi imaju za cilj da to postanu. Skoro 80% poštanskih operatora je implementiralo održivu politiku sa posebnom posvećenošću (eng. specific commitments). Prema Post Europe održivoj viziji, poštanski operatori imaju više od 30.000 električnih vozila. Takođe, poštanski operatori imaju 170.000 dostavljača koji pošiljke dostavljaju peške, i 100.000 dostavnih bicikala ili e-bicikala. Operatori dekarbonizuju svoje vozne parkove tako što koriste električnu energiju, vodonik ili biogoriva. Kako bi poštanski operatori uspešno prešli na ekološki prihvatljivije (održive) modele poslovanja neophodno je obezbediti alternativno snabdevanje energijom kao i infrastruktura za punjenje i dopunu goriva što je od suštinske važnosti. Utvrđeno je da skoro 77% energije koju koriste poštanski operatori dolazi iz obnovljivih izvora. Čak 60% poštanskih operatora proizvode obnovljivu energiju za sopstvenu potrošnju putem solarnih panela na zgradama (slika 1) [7].



Slika 1. USPS - Solarni paneli

4. Iskustva i ciljevi poštanskih operatora u segmentu održivog razvoja

Pošta Austrije je postavila cilj da do 2030. godine dostava na kućnu adresu bude bez emisije CO₂ (eng. carbon-free). U Belgije „bpost“ je postavio ciljeve održivosti koji podrazumevaju da se do 2030. godine za 20% smanji emisija gasova staklene bašte u odnosu na nivo emisije koji je bio 2017. godine. Pošta Francuske je definisala svoje ciljeve održivosti koji podrazumevaju da se u periodu od 2013.-2025. godine smanji emisija štetnih gasova za 30%, tako što će investirati u električna vozila i izvršiti optimizacija organizacije poslovanja i resursa. DPD group, podružnica kompanije La Poste 2020. godine je najavila investiciju od 200 miliona evra kako bi se obezbedila niska emisija štetnih gasova u čak 225 Evropska grada. Ova inicijativa ima za cilj smanjenje emisije CO₂ za 89% i ostalih zagađivača za 80% u posmatranim gradovima do 2025. godine. Kompanija DP DHL u Nemačkoj ima za cilj da postane CO₂ neutralna do 2050. godine. Ovaj cilj podrazumeva smanjenje lokalnog zagađenja vazduha tako što će se 70% ukupnog transporta realizovati putem električnih automobila i bicikala. Ova kompanija teži da više od 50% ostvarenih prihoda bude rezultata ekološki zelenih rešenja poslovanja i da čak 80% zaposlenih prođe obuku kako bi mogli da doprinesu ekološkim aktivnostima kompanije. Norveška pošta ima jasne ciljeve održivog razvoja koji podrazumevaju da do 2025. godine u svom poslovanju koriste samo obnovljive izvore energije kako u vozilima tako i u zgradama [8].

Programom poslovanja JP Pošta Srbije planirano je da se za 2023. godinu preduzmu mere zaštite životne sredine kao i obnova voznog parka [9]. Javno preduzeće Pošta Srbije donelo je plan javnih nabavki za 2023. godinu, koji obuhvata otvorene procedure nabavke električnih bicikala u prvom kvartalu 2023. godine i električnih vozila u četvrtom kvartalu 2023. godine [10]. Za grad Novi Sad realizovana je nabavka 31 električnog vozila, planirano je nabavka još 31 električnog vozila tako da će grad Novi Sad biti prvi grad u Srbiji gde će se dostava u potpunosti realizovati električnim vozilima (slika 2). Nakon Novog Sada planirana je zamena voznog parka električnim vozilima JP Pošte Srbije za građane Kragujevca, Niša i Beograda.



Slika 2. Električna dostavna vozila JP Pošte Srbije

5. Primena TOPSIS metode komparativnom poredenju održivih performansi CEP operatora na teritoriji Republike Srbije

U okviru ovog poglavlja data je analize CEP operatora na teritoriji Republike Srbije sa aspekta održivosti. Primenom TOPSIS metode dati su rangovi CEP operatora. Ova analiza je sprovedena među 7 najaktivnijih CEP operatora među kojima su oni koji posluju u urbanim gradskim sredinama kao i na celoj teritoriji zemlje. TOPSIS metodom istaknut je onaj operator čije poslovanje ima najmanje rastojanje od idealnog rešenja i najveće rastojanje od negativno idealnog rešenja odnosno operator čije poslovanje u najvećem stepenu poštuje sva tri aspekta održivosti (sa pripadajućim atributima).

U početnoj fazi ove analize, eksperti iz oblasti poštanskog saobraćaja dali su kvantitativne ocene svih operatora u početnoj matrici odlučivanja kao i vrednosti težinskih koeficijenata za svaki pripadajući atribut, vodeći računa na zahteve vezane za minimizaciju i maksimizaciju vrednosti atributa. Ocene su date na skali koja ima vrednosti od 0-10, (1 - veoma nizak nivo, 3 - nizak, 5 - prosečan (srednji), 7 - visok i 9 - veoma visok nivo). Kvantifikovana matrica odlučivanja ima sledeće vrednosti (tabela 1):

Tabela 1. Kvantifikovana matrica odlučivanja

	Društveni kriterijum			Ekonomski kriterijum		Ekološki kriterijum
	Stvaranje buke	Zdravlje i sigurnost zaposlenih	Poverenje korisnika u poštanske službe	Ulaganja u koncepte unapređenja poslovnih procesa	Efikasnost	Emisija štetnih gasova
C1	9	7	9	9	9	7
C2	7	7	7	7	7	7
C3	7	7	7	7	7	7
C4	1	9	5	5	7	1
C5	7	7	7	7	7	7
C6	5	7	5	5	7	5
C7	3	7	5	5	5	5
max/min	min	max	max	max	max	min
W	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2

U okviru tabele 2 izračunata su parcijalna rastojanja od idealnog rešenja i od negativno idealnog rešenja.

Tabela 2. Parcijalna rastojanja od idealnog rešenja i od negativno idealnog rešenja

Parcijalno rastojanje od idealnog rešenja iznosi:	Parcijalno rastojanje od negativno idealnog rešenja iznosi:
S1*= 0,096030	S1-= 0,055665968
S2*= 0,094531423	S2-= 0,03042
S3*= 0,094536	S3-= 0,0302088
S4*= 0,052504883	S4-= 0,0966
S5*= 0,09453136	S5-= 0,030419
S6*= 0,083227106	S6-= 0,036916
S7*= 0,082538452	S7-= 0,0447

Za posmatrani primer, relativne bliskosti idealnom rešenju iznose:

$C1^* = 0,366957465$
 $C2^* = 0,24345461$
 $C3^* = 0,24345102$
 $C4^* = 0,647866106$
 $C5^* = 0,243440885$
 $C6^* = 0,3072669021$
 $C7^* = 0,3513088952072$

Prema dobijenim rezultatima može se zaključiti da su rangovi posmatranih CEP operatora, uzimajući u obzir sva tri aspekta održivosti sledeći:

1. rang: operator C4
2. rang: operator C1
3. rang: operator C7
4. rang: operator C6
5. rang: operator C2
6. rang: operator C3
7. rang: operator C5

Dobijeni rezultati dali su pregled poslovanja CEP operatora ukazujući na to da je prema ocenama eksperata, preduzeće C4 među analiziranim poštanskim operatorima svoje poslovanje najbolje uskladilo sa aspekta održivosti. Uzimajući u obzir Angendu SPS i odluke Evropske komisije, segment održivosti, posebno ekološke održivosti će u narednom periodu biti u fokusu.

5.1 Emisija CO₂ na teritoriji grada Beograda

Prethodno istraživanje koje je sprovedeno na teritoriji grada Novog Sada dalo je pregled emisije CO₂ Javnog preduzeća Pošte Srbije za dostavna vozila koja saobraćaju na teritoriji RJ Novi Sad [11]. Za potrebe ovog rada izvršena je analiza emisije CO₂ na teritoriji grada Beograda kao i mogući efekti uštede ukoliko bi se postojeća vozila zamenila vozilima na električni pogon (tabela 4). Imajući u vidu da grad Beograd ima skoro 4 puta više stanovnika nego grad Novi Sad i da je broj pošiljaka koje je potrebno svakodnevno dostaviti korisnicima značajno veći, za proračun emisije CO₂ usled nedostatka podataka usvojena je teorija da u gradu Beogradu svakodnevno dostavu vrši bar 3 puta više vozila nego što je to slučaj u Novom Sadu. Zbog nedostatka podataka usvojena je ista struktura voznog parka što se tiče vrste i tipa vozila. U okviru tabele 3 dati su usvojeni faktori za procenu emisije CO₂ u zavisnosti od vrste goriva koje koriste vozila.

Tabela 3. Faktori emisije CO₂

Tip goriva	kgCO ₂ /kg goriva
Benzin	3,18
Diesel	3,14
LPG	3,02
CNG	2,75

Dobijene vrednosti emisije CO₂ po vrsti vozila su date na godišnjem nivou. Utvrđeno je da posmatrani poštanski operator na teritoriji grada Beograda emituje ukupno 2.392.605kg CO₂. Važno je uzeti u obzir da na posmatranom području pored JP Pošte Srbije poštanske usluge realizuje oko 23 poštanska operatora čija analiza emisije CO₂ nije razmatrana. Kako se teži smanjenju emisije CO₂ veliki broj CEP operatora razmatra mogućnost i efekte prelaska na vozila sa električnim pogonom podstaknuti podsticajem države za eko-voznju posebno u urbanim gradskim sredinama.

Tabela 4. Struktura voznog parka i procena emisije CO₂

Vrsta vozila	Tip vozila	Količina goriva (L)	Broj radnih dana	Vrsta goriva	Prosečna potrošnja	Ukupna godišnja potrošnja po vozilu	Broj vozila	Emisija CO ₂ na godišnjem nivou (kg)
Putničko	QUBO	141	23	Evro dizel	6	1692	18	95632
Teretno	BERLINGO	142	25	Evro dizel	11	1704	165	882842
Teretno	DUCATO	586	27	Evro dizel	8,9	7032	30	662414
Teretno	LF 280 FA	1330	27	Evro dizel	25,39	15960	15	751716
Ukupno						26388	228	2392605

Na teritoriji grada Novog Sada utvrđeno je da emisija CO₂ na godišnjem nivou iznosi 763.472 kg [11]. Novi Sad je dobar primer grada gde je JP Pošta Srbije krenula u potpunu elektrifikaciju voznog parka sa 62 električna dostavna vozila. Za posmatrani primer grada Beograda, ukoliko uzmemo u obzir činjenicu da je cena 1 tone CO₂ na nivou EU 101,16€ [12], troškovi društva koji nastaju [13] samo od posmatranog poštanskog operatora emisijom CO₂ iznose 242.035,922€.

6. Zaključak

Poštanski operateri igraju ključnu ulogu na jedinstvenom tržištu promovišući ekonomski rast, socijalnu koheziju i inkluziju, kao i unapređujući razvoj ruralnih područja, održavajući sve teritorije povezanim. Imajući u vidu da je smanjenje lokalnog zagađenja u većim gradovima imperativ, jedan od načina da se to postigne je da što veći broj vozila u ovom slučaju poštanskih dostavnih vozila koristi kao pogon električnu energiju. U kontekstu ovog rada data je analiza trenutnog stanja na tržištu poštanskih usluga sa aspekta održivosti, gde je sprovedeno rangiranje CEP operatora. Prema analizi koja je ralizovana za grad Beograd, ukoliko bi sva vozila prešla na električni pogon, smanjila bi se emisija CO₂ za oko 2.392 tona, što je ekvivalentno sa 242.035,922€ na godišnjem nivou. U okviru ove analize nisu razmatrane drugi benefiti prelaska dostavnih vozila na električni pogon kao što su amortizacija, buka, smanjenje potrošnje niti su vršena ispitivanja smanjenja ostalih zagađujućih materija koje nastaju sagorevanjem fosilnih goriva na teritoriji grada Beograda.

Literatura

- [1] J. F. Coloma, M. García, G. Fernández, and A. Monzón, „Environmental effects of eco-driving on courier delivery“, Sustainability., vol. 13(3), pp. 1415, 2021.
- [2] EC, “The European Green Deal”, European Commission, 2023.
- [3] UPU, Sustainable development, 2023. Available at: <https://www.upu.int/en/Universal-Postal-Union/Activities/Sustainable-Development>
- [4] International Post Corporation, Green Postal Day, 2023. Available at: <https://www.ipc.be/greenpostalday>
- [5] UPU, Sustainable development goals, 2023. Available at: <https://www.upu.int/en/Universal-Postal-Union/Outreach-Campaigns/SDGs-in-focus>
- [6] UPU, UPU members vow to cooperate on climate action, 2021. Available at: <https://www.upu.int/en/News/2021/9/UPU-members-vow-to-cooperate-on-climate-action>
- [7] Post Europ, 2022 Green Postal Day, 2022. Available at: <https://www.posteurop.org/showNews?selectedEventId=44038>
- [8] European Regulators group for postal services, ERGP Report on Green deal and the postal sector, 2021. Available at: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/46255>
- [9] JP. Pošta Srbije, „Program poslovanja javnog preduzeća Pošte Srbije, Beograd za 2023. godinu“, 2023.
- [10] JP. Pošta Srbije, „Plan javnih nabavki javnog preduzeća Pošte Srbije, Beograd za 2023. godinu“, 2023.
- [11] N. Ruškić, N. Čačić, D. Šarac, “The Effects of switching the vehicle of the post of Serbia to electric drive in Novi Sad,” 9th International Conference Towards a Humane City, Novi Sad, pp. 241-249, 2023.
- [12] Balkan green energy news, 2023. Available at: <https://balkangreenenergynews.com/rs/cene-co2-u-eu-prvi-put-premasile-100-evra-za-tonu/>
- [13] Republika Srbija, Ministarstvo za infrastrukturu, Priručnik za analizu troškova i koristi, 2010. Available at: https://www.putevi-srbije.rs/images/pdf/strategija/Prirucnik_za_analizu_troskova_i_koristi.pdf

Zahvalnica

Ovo istraživanje podržalo je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz projekat br. 451-03-47/2023-01/200156: „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena FTS (delatnosti)“.

Abstract: *The global increase in the number of parcels and express postal items has a significant impact on the carbon footprint created by postal operators during the delivery of goods, because the transfer of packages requires significantly more logistical and transport capacity than is the case for the transfer of letters. This situation presents a real challenge for postal operators to reduce their carbon footprint. The Universal Postal Union, as a specialized agency of the United Nations, is committed to working towards achieving the goals of the 2030 Agenda for Sustainable Development.*

The postal sector can play a key role in achieving the goals of sustainable development at the national, regional and international levels. Within this paper, a TOPSIS analysis of the parameters of sustainable development of selected CEP operators that carry out their business in the territory of the Republic of Serbia is given. After the TOPSIS analysis was carried out, a CO₂ emission calculation of JP Posta Serbia vehicles in the territory of the city of Belgrade was also done, based on which the potential savings of the operator were also estimated.

Keywords: *postal operators, sustainability, CEP, TOPSIS, CO₂ emission*

**ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF CEP
OPERATORS FROM THE ASPECT OF SUSTAINABILITY**

Nataša Čačić, Dragana Šarac, Bojan Jovanović, Estera Rakić

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.009>

ANALIZA SISTEMA KOMBINOVANE DOSTAVE POŠTANSKIH POŠILJAKA

Aleksandar Čupić, Mladenka Blagojević, Dejan Marković
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,
a.cupic@sf.bg.ac.rs, m.blagojevic@sf.bg.ac.rs, mdejan@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Značajni troškovi i sve veća očekivanja korisnika u pogledu usluge dostave istog dana učinili su da dostava poštanskih pošiljaka duž poslednje milje postane kritičan deo čitavog procesa dostave. Automatizacija transporta pošiljaka predstavlja šansu za razvoj efikasnijih sistema dostave koje karakteriše integracija različitih i komplementarnih vidova transporta pošiljke do krajnjeg primaoca. Akcenat ovog rada je na analizi mogućnosti implementacije integrisanog sistema dostavno vozilo - robot za dostavu duž poslednje milje. Ovaj tip problema sličan je sistemu dostavno vozilo - dron bez obzira na činjenicu da robote karakterišu mnogo manje brzine kretanja i mogućnost da izvrše nekoliko uzastopnih dostava. Na osnovu tih posebnih karakteristika robota u literaturi su razvijene heuristike koje efikasno identifikuju rešenja rutiranja robota na osnovu početnih ruta obilaska dostavnog vozila i odgovarajućih robotskih operacija. U radu je data analiza uticaja različitih karakteristika koje se tiču dizajna i rada robota i okoline na efikasnost samog sistema. Pokazano je da su sistemi za dostavu duž poslednje milje uz pomoć robota prilično efikasni ako se roboti koriste u jako saobraćajno zagušenim područjima uz smeštanje nekoliko pošiljaka u skladišni prostor samog robota.*

Ključne reči: *dostava duž poslednje milje, integrisana dostava, robot, vozilo*

1. Uvod

Poslednja milja prenosa poštanskih pošiljaka i robe uopšte predstavlja najslabiju kariku lanca snabdevanja. Osim toga, korišćenje drumskih vozila (automobili, kombi vozila, kamioni) prilikom sakupljanja i dostave pošiljaka predstavlja i izvor značajnih posledica po okolinu u vidu formiranja saobraćajnih gužvi i zagađenja životne sredine. Sve veća urbanizacija i ekspanzija e-trgovine donose dodatni pritisak razvoju efikasnih i inovativnih rešenja u domenu *city* logistike [1]. Tehnološki napredak u automatizaciji nudi priliku za razvoj novijih, održivijih i efikasnijih sistema dostave. Konkretno, vrlo aktuelan tehnološki napredak autonomnih vozila (vozila bez vozača, roboti, dronovi) priprema teren za razvoj inovativnih modela dostave koji bi mogli transformisati tehnološki postupak dostave duž poslednje milje. Potpuno automatizovana sredstva rada, kao što su dronovi i

roboti, prelaze iz čisto konceptualne faze u realnu izradu prototipova i testiranja koja trenutno vode ključni učesnici na tržištu usluga visoke tehnologije i dostave. Amazon i Google [2, 3], DHL i UPS [4, 5] rade na mogućnosti zamene skupog tradicionalnog procesa dostave zasnovanog na druskim vozilima i dostavljačima. U njihovom fokusu nalazi se dostava dronovima u područjima koja karakteriše slaba dostupnost (zbog geografskih ograničenja) ili dugo vreme dostave (zbog saobraćaja). Na osnovu dosadašnjih iskustava dokazano je da dronovi mogu efikasno funkcionisati, pre svega kao pomoćni način tradicionalnog načina dostave.

Roboti, takođe, predstavljaju zanimljivo rešenje, posebno u urbanim sredinama koje karakteriše veliki broj zaustavljanja radi dostave i relativno kratke udaljenosti između tačaka u kojima se dostava obavlja. Skladišni prostor robota, za razliku od dronova, mogao bi se podeliti u više odeljaka tako da prilikom svakog obilaska robot može opslužiti više od jednog korisnika u jednom prolasku (iako ova funkcija trenutno nije prisutna u realnim sistemima). Na taj način bi se kompenzovala njihova niža brzina kretanja i naglasila prednost koju donosi veća nosivost. Različite kompanije već testiraju robote za dostavu poštanskih pošiljaka [6] i dostavu hrane [7, 8]. Proizvođač kamiona Mercedes-Benz Vans 2016. godine započeo je partnerstvo sa Starship Technologies, proizvođačem robota za dostavu, kako bi razvio integrisanu uslugu dostave druskim vozilom i robotom, kao što je prikazano na Slici 1 [9].



Slika 1. Starship robot za dostavu

U ovom slučaju drusko vozilo prevozi jednog ili više robota koji se mogu kretati po određenom delu grada kako bi obavili dostavu duž poslednjih nekoliko stotina metara dostavne rute. Pošiljka se nalazi u samom robotu, zaključana je i mogu je preuzeti isključivo korisnici sa šifrom. Činjenica je da, iako je pošiljka bezbedna unutar robota, sam robot nije siguran od eventualne krađe, ali obzirom da je opremljen GPS-om za navođenje do mesta dostave, kao i da je predviđen za kretanje po urbanim zonama gde je prisutan veliki broj ljudi i nadzornih kamera, praktično nema opasnosti od gubitka. Iz sigurnosnih razloga, roboti, koji se kreću po trotoarima, putuju pešačkim brzinama. Bez obzira na sve veći kapacitet baterija, domet i nosivost robota su ipak ograničeni na približno 3,2 km, odnosno oko 20 kg. Integrisana usluga dostave se usled ovih ograničenja čini posebno pogodnom za distribuciju manjih pošiljaka poput paketa, sitne robe i hrane. Iako različite kompanije već razmatraju realno eksploatisanje robota za dostavu i sprovedu početne

testove, malo se zna o potencijalnim dobicima u vremenu dostave ili troškovima operacija. Dok se nekoliko studija fokusiralo na efikasnost sistema dostave dronovima u smislu uštedenog vremena i troškova [10, 11, 12, 13], vrlo malo studija se fokusiralo na konkretan slučaj robota.

I pored činjenice da se dronovi i roboti mogu u velikoj meri uključiti u istu kategoriju automatizovanih načina dostave, može se identifikovati i nekoliko bitnih razlika. Konstrukcijski, robote karakterišu veće nosivosti (20-30 kg u odnosu na 2-5 kg) i potencijalno veći broj odeljaka (što bi omogućilo dva ili više uzastopnih zaustavljanja na dostavnim rutama). Operativno, roboti se odlikuju znatno nižim brzinama (5-10 km/h prema 50-100 km/h) i dometima (5-10 km nasuprot 10-30 km). Na osnovu ovih karakteristika čini se da će roboti u bliskoj budućnosti biti prikladniji za dostavu pošiljaka manje vrednosti u urbanizovanim i gusto naseljenim sredinama, dok bi dronovi mogli biti prikladniji za dostavu vrednih pošiljaka visokog prioriteta u udaljenim ili ruralnim područjima. Konačno, roboti i dronovi će se gotovo izvesno razlikovati u pogledu regulatornog okvira jer se čini da se dronovi suočavaju sa većim sigurnosnim problemima zbog rizika od nanošenja štete ljudima i infrastrukturi. Iz tog razloga, dronovi zahtevaju dodatne dozvole za korišćenje vazdušnog prostora.

U skladu sa tim, u ovom radu razmatra se implementacija koordinisane drumsko vozilo - robot usluge dostave pošiljaka duž poslednje milje i moguće povećanje efikasnosti u različitim scenarijima koja karakterišu različiti saobraćajni uslovi, konfiguracija mesta dostave, zahteva za opslugom (dostavom), dizajna i operativnih karakteristika robota. Analize su ograničene na relativno male scenarije (veličina dostavnog rejonu sa 50-100 zaustavljanja) kako bi se fokusirale na uticaj različitih faktora na performance predloženog modela dostave. Doprinos ovog rada sastoji se u proceni potencijalnih prednosti dostave uz pomoć robota na osnovu različitih karakteristika primene i okoline. Uticaj faktora kao što su brzina i gužva u saobraćaju, kapacitet robotskog skladišta i trajanje operacija spuštanja robota sa dostavnog vozila ocenjuje se u smislu poboljšane efikasnosti. Rezultati analiza dovode do šire rasprave o mogućnostima i izazovima implementacije integrisane usluge dostave vozilom i robotima.

2. Pregled relevantne literature

Problem razmatran u radu predstavlja deo problema koji se bavi iznalaženjem optimizacionog algoritma za razvoj efikasnih „mešovitih“ ruta dostave gde je originalna ruta dostavnog vozila modifikovana tako da uključuje putovanja robota (sub-ture). Taj problem je proširenje tradicionalnog problema trgovačkog putnika (*Traveling Salesman Problem - TSP*) i deli sličnosti sa nekim nedavnim pristupima optimizacije predloženim za problem dostave uz pomoć dronova (*Traveling Salesman Problem with drones - TSP-D*). Pitanje kombinovane dostave postavljeno je od strane [14] gde je nakon predstavljanja potencijala upotrebe dronova i robota u dostavi pošiljaka dat pregled tada, još idejnih, rešenja i pilot projekata kombinovanja robota i dronova sa dramskim vozilima. U literaturi se pitanjem kombinovane dostave, između ostalih, bave autori [10, 12, 13, 15]. Koliko nam je poznato, postoje samo dva objavljena rada koja su formalno istraživala robotski asistiranu dostavu paketa, možemo je koristeći istu logiku definisati i kao problem trgovačkog putnika sa korišćenjem robota (*Traveling Salesman Problem with Robot - TSP-R*) [16, 17]. U prvom, predloženi sistem dostave se oslanja na male depoe u kojima se

paketi mogu pretovariti iz dostavnog vozila u robote koji su zaduženi za dostavu pojedinačnih paketa duž poslednje milje dostave. Autori usvajanjem različitih formulacija celobrojnog programiranja istražuju optimalne procedure za planiranje rasporeda kretanja vozila za dostavu i prebacivanje pošiljaka u robote duž rute vozila. U drugom radu autori predlažu model za identifikaciju rasporeda spuštanja i sakupljanja nekoliko robota od strane jednog dostavnog vozila na unapred određenim tačkama. Dva rada takođe su istraživala mogućnost primene robota koji bi se kretali po trotoarima kao podršku dostavi vozilima [18, 19]. U prvom radu autori su razvili sistem mikro depoa koje obilaze dostavna vozila, a koji bi služili kao svojevrsni habovi odakle bi se dalje vršila robotska dostava pošiljaka. U drugom je naglasak bio na efikasnosti dostavljanja pošiljaka uz asistenciju robota sa posebnim osvrtom na uticaj deljenja skladišnog prostora robota na procenat uštede ovakvog sistema dostave.

Rad koji, prema mišljenju autora ovog rada, daje najkonkretnije odgovore na većinu pitanja koja se tiču kombinovane dostave vozilom i robotom je rad [20]. U ovom radu autori se bave proučavanjem niza različitih scenarija kombinovane dostave koja uključuje drumsko dostavno vozilo uz asistenciju jednog robota. Autori su zapazili da, za datu rutu samo za dostavno vozilo, pronalaženje „optimalnog skupa robotskih operacija“ koji poboljšava takvu rutu odgovara određenom slučaju problema maksimalnog ponderisanog nezavisnog skupa poznatog kao problem planiranja ponderisanog intervala. Taj problem su efikasno i optimalno rešili pomoću dinamičkog programiranja. Najpre se kreira početna ruta dostavnog vozila, a zatim se dobija odgovarajuća optimalna kombinacija robotskih operacija pomoću dinamičkog programiranja. Lokalna pretraga sa adaptivnom perturbacijom (*Local Search with Adaptive Perturbation LS-AP*) gde svako rešenje odgovara različitoj početnoj ruti dostavnog vozila se izvodi da bi se iterativno poboljšala TSP-R rešenja. Jednostavnije rečeno, autori su razvili originalnu heuristiku koja najpre rešava rutiranje dostavnog vozila na celokupnom rejonu dostave, a zatim lokalnim pretraživanjem (uz perturbacije početne rute vozila) ubacuje robota koji u određenim čvorovima najpre napušta vozilo, zatim u zavisnosti od scenarija dostavlja jednu ili više pošiljaka i na kraju se vraća u tačno određenom čvoru u vozilo.

3. Osnovna koncepcija problema

Problem dostave vozilima uz pomoć robota koji se ovde razmatra (TSP-R) može se formulisati slično drugim proširenjima tradicionalnog problema trgovačkog putnika koji karakteriše mogućnost opsluživanja nekih korisnika pomoćnim vozilima. Problem trgovačkog putnika sa robotom se, po našem mišljenju, može razmatrati kao poseban slučaj TSP-D jer nije uključena nikakva dodatna infrastruktura i „spuštanje“ i „preuzimanje“ jednog robota treba da bude koordinisano sa zaustavljanjima vozila radi dostave. Međutim, postoje različite karakteristike ovog problema koje ga čine jedinstvenim. Prvo, budući da se roboti, za razliku od dronova, uvek odlikuju manjim brzinama (poredeći ih sa druskim dostavnim vozilom koje ga nosi), oni su prikladni za dostavu samo u određenim situacijama: relativno mala područja koja karakteriše velika gustina zaustavljanja radi dostave. Iz tog razloga, treba analizirati scenarija od 50-ak korisnika (primalaca paketa) na području od nekoliko kvadratnih kilometara. Operacije utovara/istovara (utovar u smislu spuštanja i preuzimanja robota) se izvode dok je vozilo zaustavljeno radi dostave (nije realno da se robot može vratiti u dostavno vozilo dok se ono kreće između dve susedne

tačke dostave). Stoga, efikasnost operacija utovara/istovara robota u/na dostavno vozilo postaje kritična u slučaju problema TSP-R, dok je ovaj aspekt relativno zanemaren kod slučaja TSP-D. Konačno, zahvaljujući mogućnosti razvoja deljivog skladišta, roboti mogu izvršiti više od jedne uzastopne dostave što bar za sad nije realna opcija za dostavu dronom. Ova činjenica, sa jedne strane, daje komparativnu prednost dostavi pomoću robota i smanjuje njihov hendikep u smislu brzine kretanja, ali sa druge strane usložnjava rešavanje optimalne rute. U literaturi su, usled velikog broja potencijalnih kombinacija, za rešavanje problema TSP-R i TSP-D korišćeni celobrojno programiranje i različiti heuristički pristupi.

Formulacija problema predstavlja specijalni slučaj problema iz teorije grafova (problem nezavisnog skupa - *Independent Set Problem*) poznatog i kao problem planiranja ponderisanog interval (*Weighted Interval Scheduling Problem*) gde je potrebno pronaći optimalan raspored poslova koji se ne preklapaju uz postizanje maksimalno mogućeg zbira pondera. Težine/ponderi mogu zavisi od različitih karakteristika vezanih za dostavu: hitnost pošiljke, njena vrednost, cena poštarine, prioritet klijenta itd. Intervali dostave su definisani vrstom usluge koja se nudi (do 12h, 19h, 4 sata po prijemu i sl.) ali je zbog relativno malog broja dostava na uskom području, koji je posledica ograničenog dometa robota, najverovatniji scenario da je vremenski okvir dostave isti za sve pošiljke.

Na osnovu ove formulacije ukupna ušteda specifičnog rada robota zavisi od originalnog niza tačaka dostave koje je posetilo dostavno vozilo, tačaka u kojima se vrši spuštanje i preuzimanje robota i zamenjenih originalnih tačaka dostave koje je trebalo da obiđe dostavno vozilo tačkama dostave koje sada opslužuje robot. Drugim rečima, cilj TSP-R „podproblema“ za datu rutu dostavnog vozila je maksimizirati ukupne uštede izborom optimalne kombinacije operacija robota.

Veoma je važno primetiti da je za bilo koju rutu obilaska dostavnog vozila moguće a priori isključiti neke operacije robota, na osnovu činjenice da je robot sporiji od vozila, što pojednostavljuje rešavanje postavljenog problema. S obzirom na potencijalnu odlaznu tačku dostave iz koje bi krenuo robot, ako je vreme potrebno robotu da stigne i opsluži potencijalnog primaoca veće od cene kompletiranja preostalog obilaska dostavnim vozilom, onda bi takva operacija robota, odnosno njegovo angažovanje, donela negativne uštede, tj. dodatni trošak i stoga se može odbaciti iz skupa mogućih rešenja. Za svaku dostavnu adresu posećenu na originalnoj ruti dostavnog vozila moguće je identifikovati „dostupni skup“ adresa koji potencijalno može da odredi pozitivne uštede. Uzimanje u obzir dostupnog skupa primalaca pošiljaka omogućava da se ubrza kreiranje robotskih operacija/poseta koje se pridodaju ruti vozila, u zavisnosti od odnosa brzina između dva vida dostave (vozilom ili robotom), oblasti koja se opslužuje i prostornog rasporeda adresa za dostavu u toj oblasti.

Da bi se dodatno smanjilo vreme rada računara za rešavanje problema koji uključuju veliki broj dostavnih tačaka originalna ruta dostavnog vozila bi se mogla podeliti na manje delove gde je isti pristup usvojen za svakog od njih nezavisno. Međutim, ovaj pristup bi doveo do gubitka efikasnosti jer bi propustio operacije/posete koje uključuju adrese za dostavu iz različitih segmenata tako podeljene rute. Obzirom da je reč o dinamičkom problemu koji bi se rešavao svakodnevno, a nekada i više puta u toku dana, naročito u veoma realnom slučaju velikog broja tačaka dostave i/ili nošenja više pošiljaka odjednom, pojednostavljenje rešavanja koje bi vodilo bržem dobijanju rute vozila i uključivanja robota može biti jedini način rešavanja u prihvatljivom vremenskom okviru.

U radu [21] dokazano je da ako se u rešavanje problema krene od optimalne rute vozila dobijene rešavanjem TSP to neće nužno doneti optimalno rešenje za probleme rutiranja sa dve vrste vozila (dostavno vozilo - robot). Međutim, može se očekivati da su TSP-R rešenja izvedena iz optimalnog obilaska dostavnog vozila obično bolja od većine rešenja dobijenih nasumičnim obilaskom. Iz tog razloga, u prvom koraku algoritma TSP-R rešenje se izvodi iz najbolje rute dostavnog vozila nakon čega se vrši sistematska lokalna pretraga sa ciljem da se identifikuju bolja kombinovana rešenja dostavnog vozila i robota modifikacijom originalne rute obilaska vozila.

Nakon identifikacije optimalne rute dostavnog vozila, operacija robota ili poseta tački dostave u suštini podrazumeva da robot sada može da opslužuje jednu ili više prvobitnih tačaka na ruti dostavnog vozila. U zavisnosti od izbora tačaka dostave gde spušta ili preuzima robota/te, dostavno vozilo može da izvrši nekoliko zaustavljanja dok je odvojeno od robota. Početna ruta dostavnog vozila može se izraziti i kao niz primalaca opsluženih hronološkim redom.

Prilikom samog rešavanja problema može se očekivati veliki broj lokalnih pretraga koje se obavljaju bez poboljšanja, u tom slučaju neophodno je da se poveća diverzifikacija tako što će se povećati verovatnoća „slučajnih perturbacija“ početne rute. Nasumične perturbacije karakteriše promenljivi broj alternativnih kretanja vozila. Broj ovih izmena takođe zavisi od stanja pretrage i povećava se sa uzastopnim lokalnim pretragama bez poboljšanja. Na taj način se sprečava zapadanje pretrage u tzv. lokalne optimume koji bi dali lažnu sliku pronalaska najboljeg rešenja.

Uzimajući u obzir prirodu problema koji se razmatra (problem dostave duž poslednje milje za određene četvrti ili centar grada), razumno je ograničiti se na relativno male probleme - do 100 primalaca. Optimalno rešavanje TSP-R koje uključuje još manje (15-ak primalaca) pomoću najsavremenijih softvera za rešavanje problema celobrojnog programiranja zahteva stotine hiljada varijabli i zahteva značajno vreme izračunavanja. Za eksperimente koji su dati u nastavku, a čiji rezultati su preuzeti od [20], pretpostavljene su sledeće vrednosti: brzina robota 1,0 m/s (nešto niža od prosečne brzine odraslog pešaka od 1,4 m/s [22]); brzina dostavnog vozila 6 m/s (u skladu sa prosečnim brzinama saobraćaja identifikovanim u različitim urbanim sredinama širom sveta [23]). Svaka dostava bez obzira da li je od strane dostavnog vozila ili robota (ne mora biti tako) zahteva zaustavljanje od 180s. Ove vrednosti su u skladu sa [24] i [25]. Prosečno vreme spuštanja/podizanja robota iznosi 60 sekundi.

4. Benefiti integrisanog sistema dostave i faktori uticaja

U nastavku su predstavljeni različiti faktori koji utiču na ukupne performanse sistema dostave vozilo-robot: brzina robota i brzina dostavnog vozila, kapacitet skladištenja robota i trajanje operacije spuštanja. Na osnovu rezultata data se neka razmatranja o praktičnim implikacijama za implementaciju sistema za dostavu asistiranu robotom.

4.1. Uticaj odnosa brzina dostavnog vozila i robota

Uticaj odnosa brzine između dva načina dostave (dostavno vozilo i robot), koji može odražavati učinak saobraćajne gužve i date infrastrukture (npr. semafori i

konfiguracija ulice) na efikasnost sistema dostave uz pomoć robota autori rada [20] testirali su pomoću nekoliko simulacija uz pretpostavku konstantne brzine robota i varijabilne brzine vozila. Nekoliko, na slučajan način definisanih, scenarija dostave koja karakterišu različite konfiguracije 50 korisnika na području od 6 km² analizirano je za datu brzinu robota od 1 m/s i brzinu vozila u rasponu od 2 m/s do 8 m/s. Ovi scenariji mogu predstavljati deo od oko 3-4 sata ukupnog trajanja regularnog obilaska ruta dostavnog vozila, odvijaju se u različitim tipovima delova grada (npr. komercijalni naspram stambenih) ili u različito doba dana (npr. vršni i vanvršni sati). Jednostavnije rečeno, realno stanje je da se dešava da se dostavna vozila i roboti kreću ovim brzinama upravo u različitim delovima grada, različitim satima u toku dana. Takve vrednosti su u skladu sa prosečnom brzinom kretanja duž poslednje milje u centru grada¹ merenom u nekoliko centralnih poslovnih četvrti u gradovima [26]. Kao što se i očekivalo, najveće uštede (u odnosu na odgovarajuće rešenje trgovačkog putnika samo sa dostavnim vozilom) nastaju u situacijama koje karakterišu visoki nivoi zagušenja gde je dostavno vozilo samo dva ili četiri puta brže od robota. U ova dva slučaja uštede su oko 21%, odnosno 17%. Za veće brzine dostavnog vozila uštede ostvarene upotrebom robota smanjuju se na vrednosti od oko 15%. Zanimljivo je da se iznad određene brzine dostavnog vozila (6 m/s ili više), iznos uštede stabilizuje oko 15%. Ovaj fenomen se može objasniti mogućnošću smanjenja ukupnih vremena dostave zahvaljujući paralelizaciji operacija dostave, koja traje 180s. Pod ovim pretpostavkama, još uvek je moguće izvesti najmanje jednu operaciju robota na 12 zaustavljanja kako bi se opslužio jedan ili dva korisnika.

Iako je malo verovatno da bi motorizovani drumski saobraćaj imao brzine niže od 2-3 m/s u većini urbanih sredina moguće je da će u nekim ograničenim područjima povremeno doći do privremenog povećanja vremena putovanja zbog nesreća ili vanrednih događaja kao što su kulturne i ostale manifestacije, iznenadne havarije na saobraćajnoj infrastrukturi i sl. U ovakvim situacijama dostava uz pomoć robota mogla bi postati posebno korisna kako bi se izbegli naleti zagušenja i smanjilo ukupno vreme dostave. U Tabeli 1 (uštede kombinovanom dostavom u poređenju sa rešenjem problema trgovačkog putnika samo za dostavno vozilo) za alternativne nivoe zakrčenosti dostavnih tačaka (gde je brzina saobraćaja jednaka 1 m/s u prvih/poslednjih 200 m oko dostavne tačke gde vozilo treba da se zaustavi) i opšte brzine dostavnog vozila (4, 6 i 8m/s) su prikazane za scenario od 50 primalaca. Za scenarija sa relativno ograničeno zagušenim područjima (npr. 10% ili 20% zagušenih dostavnih tačaka), postignute uštede su već znatno veće od odgovarajućih sa homogenim opštim brzinama dostavnog vozila (npr. za 30% zagušenih dostavnih tačaka uštede su gotovo udvostručene za bilo koju početnu brzinu vozila). Zanimljivo je da se za iste nivoe zakrčenosti dostavnih tačaka mogu postići slične uštede bez obzira na početnu brzinu dostavnog vozila. Ovaj rezultat se može objasniti mogućnošću zajedničkog sistema dostave vozilo - robot da efikasno prilagodi i modifikuje rutu kako bi se minimizovalo vreme dostave. U cilju povećanja brzine isporuke, s obzirom na nepredvidivost nastanka zastoja u saobraćaju, bilo bi korisno razviti softversku podršku za modifikaciju rute dostavnog vozila tako da robot može da opslužuje nekoliko zakrčenih područja u jednoj operaciji.

¹ Brzina kretanja duž poslednje milje u centru grada se definiše kao: „Brzina kojom vozač može da očekuje da će putovati jednu milju u centralnom poslovnom okrugu tokom vršnih sati“ [26]

Tabela 1. Uštede (%) koje odgovaraju alternativnim nivoima zakrčenosti dostavnih tačaka za date prosečne brzine saobraćaja

Zagušenost dostavnih tačaka	Opšta brzina dostavnog vozila (m/s)		
	4	6	8
0%	18,2	16,6	14,6
10%	22,7	22,8	22,9
20%	25,7	26,1	26,4
30%	28	28,2	27,9

4.2. Uticaj skladišnog kapaciteta robota

Kao što je već rečeno, mogućnost obavljanja nekoliko uzastopnih dostava robotom, zahvaljujući različitim odeljcima za skladištenje, predstavlja jednu od glavnih prednosti ovog sistema dostave (posebno u poređenju sa dronovima). Da bi se kvantifikovao uticaj ovog svojstva autori rada [20] su razmatrali 10 slučajnih scenarija sa istim karakteristikama kao u tački 4.1. Broj pošiljaka koje robot može da ponese variran je od 1 do 3, odnosno robot može da obavi maksimalno 3 uzastopna zaustavljanja po operaciji dostavljanja. Uštede (ponovo u poređenju sa originalnim rešenjem trgovačkog putnika samo sa dostavnim vozilom) značajno se povećavaju sa 10,7%, što odgovara rešenjima za rad robota sa jednim zaustavljanjem, na 16,5% i 19,6%, što odgovara operativnom rešenju robota sa 2 i 3 zaustavljanja. Iz prethodnog se može zaključiti da povećanje broja odeljaka za smeštaj pošiljaka u robotu sa jednog na tri može udvostručiti efikasnost robotskih sistema za dostavu.

4.3. Uticaj dužine operacija spuštanja i preuzimanja robota

Drugi mogući faktor uticaja na ukupnu efikasnost razmatranog kombinovanog sistema za dostavu vozilo-robot predstavlja dužina operacija spuštanja odnosno preuzimanja robota. Zavisno od stepena automatizacije procesa na relaciji dostavno vozilo-robot i mogućnosti utovara robotskih odeljaka pošiljkama pre samog stavljanja u rad robota, ovaj proces može trajati od nekoliko sekundi do nekoliko minuta. Rezultati istraživanja pokazuju da bi ukupna efikasnost sistema mogla da se smanji za oko 5% kada se dužina operacija spuštanja i preuzimanja robota poveća sa 60 s na 180 s.

4.4. Uticaj dometa dostave robota

Još jedan značajan faktor koji utiče na ukupnu efikasnost integrisanih sistema za dostavu odgovara maksimalnom dometu robota. S obzirom na oslanjanje robota na punjive baterije, prisustvo nekoliko fizičkih prepreka u urbanim okruženjima i obezbeđivanje sigurnosti kroz solidnu konstrukciju, udaljenost robota, u ekstremnim situacijama, može biti ograničena na svega nekoliko stotina metara. Ipak daleko je realnije da taj domet bude znatno veći tako da su uštede koje postižu roboti kada maksimalni prag za radnu udaljenost koju mogu da pređu poraste na 1000m iznosi 8,7% uštede. Na svakih 500m rasta dometa povećava se ušteda od 1,36% do 1,66% da bi za domet od 3000m iznosila značajnih 14,6% uštede. Za domete iznad 3000m i kada je brzina kretanja dostavnog vozila 6 puta veća od brzine kretanja robota moguće je ostvariti uštede koje se kreću oko 20-ak procenata. Na

osnovu svega navedenog jasno je da različite maksimalne udaljenosti po operaciji robota imaju značajan uticaj na ukupnu efikasnost sistema.

5. Diskusija

Rezultati prethodnih analiza daju prostora za neka korisna razmatranja u vezi sa implementacijom sistema dostave vozilima uz pomoć robota u scenarijima koje karakteriše nekoliko desetina korisnika (primalaca), gde jedan robot može otići iz dostavnog vozila zbog jedne ili više uzastopnih dostava. U zavisnosti od nekoliko faktora koji se tiču operativnih i konstrukcijskih karakteristika robota i spoljašnjeg okruženja takvi integrisani sistemi bi mogli da obezbede značajnu uštedu u vremenu i trošku dostave (u poređenju sa tradicionalnim načinom dostave vozilom).

S obzirom na relativno nisku brzinu robota (1m/s), idealan scenario implementacije podrazumevao bi ograničeno područje (npr. centar grada), visok stepen saobraćajne gužve u tom području (sa prosečnom brzinom ispod 4m/s) i gustu konfiguraciju korisnika (10 ili više korisnika po km²). Ovde bi uštede ostvarene u pogledu obilaska samo dostavnim vozilom bile oko 20%. Ovakvi uslovi bi se realno mogli javiti u gusto naseljenim urbanim područjima tokom najzagušenijih sati. S druge strane, postoji problem navigacije robota u područjima sa velikom gužvom. Prisutnost malih područja zagušenja oko ograničenog broja korisnika takođe predstavlja priliku za implementaciju robota koji može povećati ukupnu efikasnost dostave u takvim situacijama i do 30%. Ova vrsta scenarija se često javlja kao rezultat saobraćajnih nesreća, privremenih uskih grla i posebnih događaja.

Mogućnost podele skladišta u više odeljaka za više uzastopnih dostava omogućava značajno povećanje efikasnosti (10% do 17%). Trenutni dizajn sa jednom pregradom će verovatno morati da bude modifikovan da bi mogao da prihvati više pošiljaka naročito kako zbog razvoja baterija bude rastao njihov domet. Relativno mali domet može da smanji ukupne uštede za 6 - 8%. pa treba uzeti u obzir trajanje baterija ovih uređaja i mogućnost njihovog pravovremenog punjenja. Konačno, efikasnost operacija spuštanja i preuzimanja robota može uticati na ukupne performanse sistema sa razlikama od oko 5% između dostave od 1min i 3min. Mogućnost utovara robota dok je dostavno vozilo na putu, ovde nije uzimana u obzir, ali može značajno uštedeti vreme.

U poređenju sa dostavom asistiranom dronova, sistemi potpomognuti robotima generalno su manje učinkoviti zbog relativno malih brzina i ograničenja za rad na istoj mreži putne infrastrukture. Ipak, kada se uzme u obzir nosivost, domet i mogućnost nošenja više od jedne pošiljke uz ograničenja u vidu vremenske izdržljivosti, zajedno sa drugim ograničenjima kao što su zone zabrane letenja, jaz između drona i robota postaje mnogo uži. Konkretno, gušća i zagušena područja dostave ograničene veličine nude mogućnost sistemima potpomognutim robotima da značajno poboljšaju performanse dostave uz dobitke do 30%.

6. Zaključak

Roboti za dostavu predstavljaju novu priliku za poboljšanje dostave duž poslednje milje u urbanim sredinama. Cilj sistema za dostavu vozilom potpomognutim robotom je da delimično zamene rute vozila i poveća brzinu procesa dostave duž poslednje milje. U ovom radu prikazani su neki od testnih rezultata analize sistema dostave vozilima uz pomoć

robotu u kojem jedan robot može otići iz vozila kako bi obavio jednu ili više dostava krećući se trotoarom. Vreme putovanja korišćeno je kao glavni indikator učinka, dok druge vrste troškova, kao što su troškovi rada i održavanja nisu uzeti u obzir. Rezultati pokazuju da stepen ostvarive uštede u vremenu putovanja nije jednostavan i snažno zavisi od faktora kao što su odnos brzine između vozila i robota, kapacitet skladišta robota i razmeštaja primalaca. U manjoj meri trajanje spuštanja/podizanja robota na/sa trotoar može uticati na ukupnu efikasnost.

U poređenju sa dostavom asistiranom dronovima (dronovi sa velikim dometom leta i brzinom dvostruko ili tri puta većom od brzine kretanja dostavnog vozila u gradu), dostavu asistiranu robotom karakterišu manje uštede. Međutim, kada se koristi samo jedan dron sa većim ograničenjima u smislu brzine i dometa leta, prednosti dva sistema su uporedive. Ovo je interesantan ishod koji treba imati na umu kada se razmišlja o komercijalnoj implementaciji usluga dostave duž poslednje milje zasnovane na automatizovanim tehnologijama.

Obzirom da su zone dostave pošiljaka, naročito u slučaju većih gradova u Srbiji, često kombinacija gusto naseljenih urbanih zona sa nepristupačnim i geografski, odnosno infrastrukturno odsečenih lokacija, možda je optimalno rešenje za asistiranu dostavu ono koje uz drumsko vozilo dodaje i robotsku i dostavu pomoću drona. Korišćenje više od jednog robota ili drona svakako bi poboljšalo učinak čitavog sistema, takvih pilot projekata već ima, ali bi zahtevalo i daleko kompleksniju metodologiju (najverovatnije neku metaheuristiku) za rešavanje problema. U bilo kojoj varijanti asistirane dostave mogu se ostvariti značajne uštede upotrebom autonomnog vozila umesto klasičnog jer bi i mala asistencija vozaču/kuriru tokom vožnje dala dovoljno vremena da pripremi robotsko vozilo ili dron za sledeću dostavu.

Literatura

- [1] M. Savelsbergh, T. and Van Woensel, "50th anniversary invited article – city logistics: challenges and opportunities", *Transportation Science*, 50 (2), pp. 579–590, 2016
- [2] S. Halzack (2016). Amazon makes its first drone delivery to a real customer. The Washington Post. Available at: https://www.washingtonpost.com/news/business/wp/2016/12/14/amazon-makes-its-first-drone-delivery-to-a-real-customer/?utm_term=.c4c7027b4021.
- [3] J. Nicas (2018). Google's Parent Births New Businesses: Balloons and Drones. The New York Times. Available at: <https://www.nytimes.com/2018/07/11/technology/google-drones-internet-balloons.html>.
- [4] A. Hern (2014). DHL launches first commercial drone 'parcelcopter' delivery service. The Guardian. Available at: <https://www.theguardian.com/technology/2014/sep/25/german-dhl-launches-first-commercial-drone-delivery-service>.
- [5] J. Desjardins (2018). Amazon and UPS are betting big on drone delivery. Business Insider. Available at: <http://www.businessinsider.com/amazon-and-ups-are-betting-big-on-drone-delivery-2018-3>.
- [6] C. Bishop (2016). Swiss Post trials robot parcel deliveries in Bern. The Local. Available at: <https://www.thelocal.ch/20160823/swiss-post-trials-robot-parcel-deliveries-in-bern>.

- [7] J. Burns (2016). Domino's Pizza Robot Making Deliveries In Australia. Forbes. Available at: <https://www.forbes.com/sites/janetwburns/2016/03/18/dominos-pizza-robot-is-making-deliveries-in-australia/#2528686b7d59>.
- [8] D. Coldewey (2019). Kiwi's food delivery bots are rolling out to 12 more colleges. TechCrunch. Available at: <https://techcrunch.com/2019/04/25/kiwis-food-delivery-bots-are-rolling-out-to-12-new-colleges/>
- [9] Daimler, (2017). Vans & Robots. Small delivery robots out of the Sprinter. Available at: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/vehicles/transporter/vans-robots-small-delivery-robots-out-of-the-sprinter/>.
- [10] C.C. Murray and A.G. Chu, "The flying sidekick traveling salesman problem: optimization of drone-assisted parcel delivery", *Transport. Res. C: Emerg. Technol.* 54, 86-109, 2015.
- [11] J.G. Carlsson and S. Song, "Coordinated logistics with a truck and a drone", *Manage. Sci.* 64 (9), 4052–4069, 2017.
- [12] X. Wang, S. Poikonen, B. Golden, "The vehicle routing problem with drones: several worst-case results", *Optimiz. Lett.* 11 (4), 679–697, 2017.
- [13] Agatz, N., Bouman, P., Schmidt, M., 2018. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transport. Sci.* 52 (4), 965–981.
- [14] A. Čupić, M. Blagojević, G. Marković, "Some Modern Solutions for Delivery Operation in Postal Traffic", IX International Conference "Heavy Machinery-HM2017", Zlatibor, str. 87-94, 2017.
- [15] Q.M. Ha, Y. Deville, Q.D. Pham, M.H. Hà, "On the min-cost traveling salesman problem with drone", *Transport. Res. Part C: Emerg. Technol.* 86, 597–621, 2018.
- [16] Boysen, N., Schwerdfeger, S., Weidinger, F., 2018. "Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots", *Eur. J. Oper. Res.* 271 (3), 1085–1099.
- [17] D. Jennings & M. Figliozzi, "Study of Sidewalk Autonomous Delivery Robots and Their Potential Impacts on Freight Efficiency and Travel", *Transportation Research Record*, 2673(6), 317-326, 2019, <https://doi.org/10.1177/0361198119849398>
- [18] M. Poeting, S. Schaudt, U. Clausen, "Simulation of an optimized last-mile parcel delivery network involving delivery robots". In: Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic, Springer, Cham, pp. 1–19, 2019.
- [19] M.O. Sonneberg, M. Leyrer, A. Kleinschmidt, F. Knigge, M.H. Breitner, "Autonomous Unmanned Ground Vehicles for Urban Logistics: Optimization of Last Mile Delivery Operations", In: Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences, 2019.
- [20] M.D. Simoni, E. Kutanoglu, C.G. Claudel, "Optimization and analysis of a robot-assisted last mile delivery system", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 142, 102049, ISSN 1366-5545, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102049>.
- [21] R. Cuda, G. Guastaroba, M.G. Speranza, "A survey on two-echelon routing problems", *Comput. Oper. Res.* 55, 185-199, 2015.
- [22] R. Knoblauch, M. Pietrucha, M. Nitzburg, "Field studies of pedestrian walking speed and start-up time", *Transport. Res. Rec.: J. Transport. Res. Board* 1538, 27–38, 1996.
- [23] Uber Movements (2019). Uber Technologies, Inc. Available at: <https://movement.uber.com>

- [24] A. Conway, X. Wang, Q. Chen, J. Schmid (2016). Freight Costs at the Curbside. Final Report. Available at: <http://www.utrc2.org/sites/default/files/Final-ReportFreight-Costs-at-Curbside.pdf>
- [25] J. Allen, M. Piecyk, M. Piotrowska, F. McLeod, T. Cherrett, K. Ghali, S. Wise, "Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: the case of London", *Transport. Res. D: Transp. Environ.* 61, 325–338, 2017.
- [26] T. Reed and J. Kidd (2019). Global Traffic Scorecard. INRIX Research. Available at: <http://inrix.com/scorecard/>.

Abstract: *Significant costs and increasing customer expectations for the same-day delivery have made last-mile mail delivery a critical part of the entire delivery process. The automation of transport represents a chance for the development of more efficient delivery systems characterized by the integration of different and complementary modes of transportation to the final recipient. The emphasis of this work is on the analysis of the possibility of implementing an integrated delivery vehicle - robot system for delivery along the last mile. This type of problem is similar to the delivery vehicle - drone system, despite the fact that the robots are characterized by much lower movement speeds and the ability to make several consecutive deliveries. Based on these special robot characteristics, in the literature heuristics have been developed that efficiently identify robot routing solutions based on the delivery vehicle's initial tour routes and corresponding robot operations. An analysis of the influence of various characteristics concerning the design and operation of the robot and the environment on the efficiency of the system itself is given. Robot-assisted last-mile delivery systems have been shown to be quite efficient if the robots are used in heavily traffic-congested areas while placing several items in the robot's own warehouse.*

Keywords: *last mile delivery, integrated delivery, robot, vehicle*

ANALYSIS OF THE SYSTEM OF COMBINED DELIVERY OF POSTAL ITEMS

Aleksandar Čupić, Mladenka Blagojević, Dejan Marković

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.010>

IZBOR ODRŽIVOG MODELA DOSTAVE KORIŠĆENJEM AROMAN VIŠEKRITERIJUMSKE ANALIZE

Momčilo Dobrodolac¹, Sara Bošković², Stefan Jovčić², Dragan Lazarević¹

¹Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, m.dobrodolac@sf.bg.ac.rs,
d.lazarevic@sf.bg.ac.rs

²University of Pardubice – Faculty of Transport Engineering,
sara.boskovic@student.upce.cz, stefan.jovcic@upce.cz

Rezime: *Razvoj elektronske trgovine rezultovao je povećanjem broja pošiljaka u sistemima za njihov prenos. Dostavne kompanije nastoje da kroz optimizaciju svog poslovanja odgovore na novonastalu situaciju, zadovolje potrebe korisnika i ostvare profit. Imperativ predstavlja uspostavljanje sistema dostave koji je u skladu sa principima održivog razvoja. U ovom radu je definisan zadatak izbora održivog modela dostave pošiljaka i predložena AROMAN metoda za njegovo rešavanje. Primenljivost predložene metode prikazana je na primeru rešavanja definisanog zadatka na teritoriji grada Beograda.*

Ključne reči: *e-trgovina, tehnološki razvoj, održivi modeli dostave, višekriterijumska analiza*

1. Uvod

Razvoj e-trgovine i drugih poslovnih modela, čija osnovna delatnost zavisi od prenoša pošiljaka između lokacija pošiljaoca i primaoca, utiče na generisanje velikog broja pošiljaka u poštanskim i drugim sistemima dostave. Izazovi sa kojima se suočavaju dostavne kompanije u pogledu optimizacije poslovnih aktivnosti, dodatno su otežani regulativama, koje u fokusu imaju unapređenje održivosti sistema.

U poslednjoj deceniji, značajan tehnološki razvoj, doprineo je i razvoju poštanskih kompanija. Pored informacionih sistema i brojnih softvera koji omogućavaju efikasno obavljanje poslovnih aktivnosti, značajan napredak desio se i na polju tehnološke opremljenosti i mehanizacije koja se koristi u pojedinim fazama prenoša. Dodatno, razvoj automobilske industrije i kargo transporta, omogućio je i osveženje voznih parkova u kompanijama. U skladu sa regulativama Evropske unije, akcenat je stavljen na radikalno smanjenje emisija štetnih gasova. Na teritoriji Evropske unije (EU), transport je izvor za oko 30% ukupne emisije CO₂, od čega preko 70% dolazi kao produkt drumskog transporta. EU je definisala dugoročni cilj, koji podrazumeva da se do 2050. godine za 60% smanje

emisije u odnosu na nivo iz 1990. godine, koje potiču iz transporta.¹ Navedeno je ubrzalo proces implementacije u saobraćaj transportnih sredstava na hibridni i električni pogon, ali i na druga alternativna goriva. Tako da danas možemo govoriti o trendu elektrifikacije voznih parkova poštanskih kompanija.

U samom procesu prenosa pošiljaka, po svojim karakteristikama, posebno se izdvaja poslednja faza – dostava pošiljaka. Jedan od osnovnih razloga jeste kompleksnost organizacije poslovnih aktivnosti, usled brojnih ograničenja i zahteva za brzim i efikasnim prenosom. Takođe, dostava predstavlja troškovno najskuplju fazu u procesu prenosa pošiljaka. Iz tog razloga, od velikog značaja jeste optimizacija poslovnih aktivnosti u ovoj fazi, što potvrđuje i veliki broj studija koji se bavi ovim zadacima [1-3].

U ovom radu, u okviru studije slučaja, rešavan je zadatak izbora pogodnog modela za dostavu pošiljaka na delu teritorije Beograda. Naime, primenom predložene AROMAN metode, u saradnji sa ekspertima, izvršeno je rangiranje alternativa, odnosno modela za dostavu.

2. Pregled literature

U ovom odeljku predstavljen je pregled literature u oblasti dostave pošiljaka. Autori ovog rada su istraživali baze naučnih radova publikovanih u poslednjih pet godina. S obzirom na veoma veliku popularnost na polju dostave, naučnici kao i poštanski operatori širom sveta ulažu velike napore kako bi krajnji korisnik, koji je ključni faktor, bio zadovoljan. Rezultat toga jeste publikovanje velikog broja radova iz ove oblasti poslednjih godina. Autori pristupaju različitim problemima, kao što su izbor koncepta distribucije kargo biciklima [4], održiva dostava [1], izbor električnog vozila za dostavu [5], održivi vidovi dostave u urbanoj logistici [6], inovativna rešenja, koncepti, izazovi i prakse u fazi dostave [7], posledice i prepreke u fazi dostave [8], izazovi i rešenja za dostavu bez vozača [9], faktori koji utiču na prihvatanje zelene dostave od strane e-kupaca [10], merenje zadovoljstva korisnika e-trgovine u fazi dostave [11], potencijal dostave dronovima [12]. Radi bolje preglednosti, rezultati istraživanja, predstavljeni su i u Tabeli 1.

Tabela 1. Pregled literature na polju dostave pošiljaka

Autor (godina publikacije)	Zadatak
Švadlenka i saradnici, 2020	Održiva dostava
Yilmaz i saradnici, 2022	Održivi vidovi dostave u urbanoj logistici
Balaska i saradnici, 2022	Izazovi i rešenja za dostavu bez vozača
Bošković i saradnici, 2023a	Izbor koncepta distribucije kargo biciklima
Bošković i saradnici, 2023b	Izbor električnog vozila za dostavu
Mohammad i saradnici, 2023	Inovativna rešenja, koncepti, izazovi i prakse u fazi dostave
Kader i saradnici, 2023	Faktori koji utiču na prihvatanje zelene dostave od strane e-kupaca
Vrhovac i saradnici, 2023	Merenje zadovoljstva korisnika e-trgovine u fazi dostave
Eskandaripour i Boldsai Khan, 2023	Potencijal dostave dronovima

¹ European Parliament: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>

U ovom radu, autori su odlučili da primene novi višekriterijumski pristup rešavanja problema izbora održivog modela dostave koju su nedavno razvili Bošković i saradnici [5]. S obzirom na činjenicu da je metoda relativno nova, do sada ima primenu u rešavanju nekoliko tipova problema: Intuicionistički, rasplinuti model za procenu performansi EcoPorts [13], intervalna metoda donošenja odluka tipa 2 Fuzzi AROMAN za poboljšanje održivosti poštanske mreže u ruralnim područjima [14], model donošenja odluka za izbor profesionalnih vozača [15], evaluacija održivog upravljanja ljudskim resursima u proizvodnim firmama [16]. Rezultati su prikazani u Tabeli 2.

Tabela 2. Pregled primene AROMAN metode u literaturi

Autor (godina publikacije)	Zadatak potpuno ili delimično rešavan AROMAN metodom
Bošković i saradnici, 2023b	Izbor električnog vozila za dostavu
Yalçın i saradnici, 2023	Model za procenu performansi EcoPorts
Nikolić i saradnici, 2023	Poboljšanje održivosti poštanske mreže u ruralnim područjima
Čubranić-Dobrodolac i saradnici, 2023	Izbor profesionalnih vozača
Rani i saradnici, 2023	Procena održivog upravljanja ljudskim resursima u proizvodnim firmama
Ovaj rad 2023	Održivi model dostave – izbor moda dostave

3. AROMAN metoda

Metoda AROMAN je jedna od novijih metoda višekriterijumske analize koju su razvili Bošković i saradnici [5]. Ovaj metod kombinuje normalizovane podatke iz normalizacije u dva koraka i dobija prosečnu agregiranu matricu iz normalizovanih podataka. AROMAN metoda se može opisati u sledećim koracima:

Korak 1. Određivanje početne matrice odlučivanja sa ulaznim podacima.

Pre otpočinjanja postupka odlučivanja potrebno je definisati početnu matricu odlučivanja sa ulaznim podacima. U zavisnosti od problema, ulazni podaci se uglavnom prikupljaju unapred u pogledu alternativa i kriterijuma. Stoga, pretpostavimo da imamo matricu odlučivanja $X_{m \times n}$ sa ulaznim podacima $x_{11}, \dots, x_{2j}, \dots, x_{mn}$, (Jednačina 1):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{21} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; \quad (1)$$

Korak 2. Normalizacija ulaznih podataka.

Nakon što je definisana matrica odlučivanja sa ulaznim podacima, drugi korak je normalizacija ulaznih podataka. To znači da ulazni podaci treba da budu strukturirani u intervalima između 0 i 1. Postoje dva tipa normalizacije (Jednačina 2 i 3):

Korak 2.1 Linearna normalizacija

$$t_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

Korak 2.2 Vektorska normalizacija

$$t_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

Korak 2.3 Prosečna agregirana normalizacija

Agregirana prosečna normalizacija se vrši primenom Jednačine 4:

$$t_{ij}^{norm} = \frac{\beta t_{ij} + (1-\beta) t_{ij}^*}{2}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

gde t_{ij}^{norm} označava agregiranu prosečnu normalizaciju. β je težinski faktor koji varira u intervalu od 0 do 1. U našem slučaju, uzeli smo u obzir da je $\beta = 0,5$.

Korak 3. Određivanje otežane prosečne normalizovane matrice donošenja odluka.

Otežana prosečna normalizovana matrica se računa na osnovu Jednačine 5.

$$\widehat{t}_{ij} = W_{ij} \cdot t_{ij}^{norm}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

Korak 4. Sumiranje otežanih normalizovanih vrednosti prema tipu kriterijuma

Ovo se može izračunati primenom Jednačina 6 i 7:

$$L_i = \sum_{j=1}^n \widehat{t}_{ij}^{(min)}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$A_i = \sum_{j=1}^n \widehat{t}_{ij}^{(max)}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Korak 5. Stepenovanje dobijenog zbira vrednosti L_i i A_i na parametar λ

Ovaj korak se izračunava primenom Jednačina 8 i 9.

$$L_i^{\wedge} = L_i^{\lambda} = (\sum_{j=1}^n \widehat{t}_{ij}^{(min)})^{\lambda}; \quad (8)$$

$$A_i^{\wedge} = A_i^{1-\lambda} = (\sum_{j=1}^n \widehat{t}_{ij}^{(max)})^{1-\lambda}. \quad (9)$$

λ predstavlja stepen koeficijenta tipa kriterijuma. Pošto smo uključili oba tipa kriterijuma, smatrali smo da je parametar $\lambda=0.5$.

Korak 6. Izračunavanje razlike između vrednosti A_i^{\wedge} i L_i^{\wedge} i primenjivanje jednačine konačnog rangiranja (R_i).

$$R_i = e^{(A_i^{\wedge} - L_i^{\wedge})} \quad (10)$$

gde R_i označava konačan rang alternativa.

4. Studija slučaja

U okviru studije slučaja, analiziran je deo teritorije Beograda (Slika 1), koji je pogodan reprezent čitave teritorije grada usled pripadajućeg reljefa, gustine naseljenosti i razvijenosti saobraćajne mreže. Osnovni cilj je bio da se za skup odabranih alternativa za dostavu definiše rang, a u skladu sa izdvojenim kriterijumima. Primenjena je AROMAN metoda višekriterijumske analize, zasnovana na saradnji sa ekspertima iz oblasti poštanskog saobraćaja. Najpre su definisani kriterijumi i alternative za dostavu. Nakon toga, realizovano je ocenjivanje kriterijuma, kao i alternativa u odnosu na zadate kriterijume.

U saradnji sa ekspertima formiran je skup sledećih kriterijuma:

K1. Troškovi investicija i eksploatacije – Podrazumevaju sve one troškove koji se odnose na uspostavljanje sistema, odnosno na edukaciju, nabavku tehnologije i sredstava, koji će obezbediti nesmetano funkcionisanje određenog načina dostave. Dodatno, podrazumeva i troškove koji nastaju tokom realizacije dostave;

K2. Energetska efikasnost – Odnosi se na potrošnju energije prilikom realizacije procesa dostave. Značaj energetske efikasnosti, ne ogleda se samo kroz troškove, već i kroz smanjenje emisija štetnih gasova. Jedan od glavnih ciljeva društveno odgovornih kompanija jeste smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu i promocija ekološki odgovornog obavljanja poslovnih aktivnosti;

K3. Nivo buke – Buka u kontekstu dostave pošiljaka ima značajan uticaj na okolinu i kvalitet života stanovnika, pre svega u urbanim sredinama. Aktivnosti dostave podrazumevaju korišćenje različitih vrsta vozila, koji generišu značajan nivo buke. Postoji trend da se razvijaju tiši i ekološki prihvatljiviji modeli dostave;

K4. Zauzimanje javnog prostora – Podrazumeva korišćenje javnih površina prilikom realizacije dostave. Jedan od najprisutnijih primera jeste parkiranje vozila kojim se vrši dostava. U zavisnosti od modela dostave, može biti značajno ograničenje, pre svega u urbanim sredinama;

K5. Brzina dostave – Odnosi se na vreme realizacije dostave, uz težnju da ono bude što kraće. Ovaj parametar je jako važan u eri ekspanzije e-trgovine, gde dostava narednog dana postaje standard. Kupci su sve zahtevniji i očekuju da njihove pošiljke budu dostavljene što je moguće brže;

K6. Kapacitet dostave – U zavisnosti od modela dostave, zavisi i kapacitet, odnosno broj pošiljaka koje je moguće dostaviti u određenom vremenskom intervalu.

Postoje modeli, gde se pojedinačna dostava može realizovati u veoma kratkom vremenskom intervalu, međutim usled malog tovarnog prostora transportnog sredstva, na narednu dostavu se čeka duži vremenski period (dok transportno sredstvo ponovo stigne do centra, gde se vrši utovar pošiljke za narednu dostavu);

K7. Zdravlje i bezbednost na radu – Ima veoma važnu ulogu u sistemima dostave pošiljaka, gde radnici često rade pod pritiskom rokova, obimnih ruta i teških fizičkih zahteva. U zavisnosti od modela dostave, radnici su izloženi različitim rizicima, ali i drugi ljudi koji se mogu naći u neposrednoj blizini obavljanja poslovnih aktivnosti;

K8. Mobilnost (prilagodljivost na različite uslove) – U zavisnosti od modela dostave, zavisi i upotreba određenog transportnog sredstva, a samim tim i mogućnost da se odgovori na različite nepredviđene okolnosti. Jedan od čestih primera iz prakse jesu zastoji u saobraćaju, gde se očekuje da se proces dostave nastavi alternativnom rutom u kratkom vremenskom intervalu;

K9. Kompleksnost realizacije dostave – Dostava pošiljaka može biti veoma kompleksan proces zbog mnogobrojnih faktora koji utiču na uspešnost čitavog procesa. Ovi faktori uključuju izbor modela dostave, dinamiku saobraćaja, različite rute za dostavu, vrste pošiljaka i potrebe klijenata;

K10. Adaptacija na vremenske uslove – Podrazumeva nezavisnost modela dostave u odnosu na vremenske uslove, odnosno prilagođavanje određenog modela dostave promeni vremenskih prilika.



Slika 1. Analizirana teritorija [17]

Pored navedenih kriterijuma, za zadatak višekriterijumskog odlučivanja izdvojeno je narednih 7 alternativa modela za dostavu, pri čemu je usvojeno da za svaku alternativu postoje regulativni uslovi za eksploataciju:

A1. Poštonoša pešačenjem – Podrazumeva izvorni oblik tradicionalne dostave pošiljaka, koja se obavlja od strane poštonoše, koji ne koristi transportno sredstvo. Ovaj pristup je i dalje prisutan u mnogim urbanim i ruralnim sredinama;

A2. Električni kargo bicikl – Dostava pošiljaka električnim kargo biciklima je inovativan i ekološki prihvatljiv model. Kargo bicikli su opremljeni električnim pogonom i tovarnim prostorom, što pomaže vozačima da premoste veće udaljenosti i da prevoze veći broj pošiljaka;

A3. Električni trotinet – Dostava pošiljaka e-trotinetom postaje sve popularnija u urbanim sredinama. Za sada se uglavnom koriste prilikom dostave hrane, ali postaju prisutni i prilikom dostave drugih tipova pošiljaka;

A4. Električni mobilni paketomat – Za razliku od fiksnih paketomata, u skladu sa zahtevima i potrebama, kreću se odgovarajućom rutom na definisanoj teritoriji. Korisnici imaju mogućnost da putem aplikacije prate lokaciju paketomata i na taj način planiraju korišćenje usluge. Korak napred ka održivoj dostavi predstavljaju mobilni paketomati na električni pogon;

A5. Električni automobil – Podrazumeva tradicionalni koncept dostave pošiljaka od strane kurira, koji u ovom slučaju za realizaciju aktivnosti koristi električni automobil;

A6. Autonomni robot za dostavu – Predstavlja tehnološko inovativni model dostave, koji podrazumeva dostavu od strane robota koji se kreće bez vozača. Kretanje robota obezbeđuje odgovarajući sistem senzora i navigacioni sistem. Po dolasku na lokaciju za dostavu, nakon autentifikacije, korisniku se omogućuje pristup tovarnom prostoru i pošiljci;

A7. Dron – Zasniva se na korišćenju bespilotnih letelica za prenos pošiljaka. Ovaj koncept ima brojne prednosti, poput brzine prenosa i mogućnosti prilaza teško dostupnim lokacijama. Međutim, prisutna su i određena ograničenja, poput regulative, bezbednosti i kapaciteta dostave.

4.1 Rezultati i Diskusija

Nakon primene AROMAN metode, dobijen je konačan rang alternativa. Rezultati su predstavljani u Tabelama od 3 do 8. Prvi korak je formiranje matrice ulaznih podataka. Matrica ulaznih podataka je formirana na osnovu konsultacije sa ekspertima iz oblasti poštanskog saobraćaja. Tri eksperta je na skali od 1 do 10 dalo ocene važnosti svake alternative na osnovu izdvojenih kriterijuma. Takođe, eksperti su ocenjivali važnost svakog kriterijuma, s obzirom na činjenicu da nisu svi kriterijumi podjednako važni za donosioc odluka. Matrica ulaznih podataka je predstavljena u Tabeli 3.

Nakon formiranja početne matrice donošenja odluka, sledeći korak je normalizacija ulaznih podataka. Drugim rečima, to je proces svodenja podataka u intervalu od nule to jedan, sa ciljem dobijanja iste strukture podataka. Kod AROMAN metode, koristi se kombinacija dva tipa normalizacije, linearna i vektorska. Nakon toga se normalizovani podaci kreiraju kroz agregaciju linearne i vektorske normalizacije prateći korake AROMAN metode. Normalizovani podaci su respektivno predstavljeni u Tabelama 4-6.

Tabela 3. Početna matrica ulaznih podataka

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀
A ₁	5	10	1	1	1	2	2	4	2	5
A ₂	3	9	2	3	7	7	4	7	3	4
A ₃	4	7	3	2	6	2	1	6	3	3
A ₄	2	3	5	8	4	10	6	4	6	9
A ₅	1	4	4	7	5	9	6	4	4	9
A ₆	8	7	2	5	2	5	7	3	9	5
A ₇	7	7	6	2	8	1	7	10	10	4
Wi	0.11554	0.09960	0.09960	0.06375	0.09562	0.10359	0.11952	0.11155	0.09163	0.09960

Tabela 4. Linearna normalizacija

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀
A ₁	0.5714	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1111	0.1667	0.1429	0.0000	0.3333
A ₂	0.2857	0.8571	0.2000	0.2857	0.8571	0.6667	0.5000	0.5714	0.1250	0.1667
A ₃	0.4286	0.5714	0.4000	0.1429	0.7143	0.1111	0.0000	0.4286	0.1250	0.0000
A ₄	0.1429	0.0000	0.8000	1.0000	0.4286	1.0000	0.8333	0.1429	0.5000	1.0000
A ₅	0.0000	0.1429	0.6000	0.8571	0.5714	0.8889	0.8333	0.1429	0.2500	1.0000
A ₆	1.0000	0.5714	0.2000	0.5714	0.1429	0.4444	1.0000	0.0000	0.8750	0.3333
A ₇	0.8571	0.5714	1.0000	0.1429	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.1667

Tabela 5. Vektorska normalizacija

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀
A ₁	0.3730	0.6047	0.0000	0.0000	0.0000	0.0709	0.0870	0.1140	0.0000	0.2209
A ₂	0.1865	0.5183	0.1336	0.1933	0.5145	0.4253	0.2611	0.4558	0.0861	0.1104
A ₃	0.2798	0.3455	0.2673	0.0967	0.4287	0.0709	0.0000	0.3419	0.0861	0.0000
A ₄	0.0933	0.0000	0.5345	0.6767	0.2572	0.6380	0.4352	0.1140	0.3443	0.6626
A ₅	0.0000	0.0864	0.4009	0.5800	0.3430	0.5671	0.4352	0.1140	0.1721	0.6626
A ₆	0.6528	0.3455	0.1336	0.3867	0.0857	0.2836	0.5222	0.0000	0.6025	0.2209
A ₇	0.5595	0.3455	0.6682	0.0967	0.6002	0.0000	0.5222	0.7977	0.6885	0.1104

Tabela 6. Agregirana normalizacija

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀
A ₁	0.2361	0.4012	0.0000	0.0000	0.0000	0.0455	0.0634	0.0642	0.0000	0.1385
A ₂	0.1181	0.3439	0.0834	0.1198	0.3429	0.2730	0.1903	0.2568	0.0528	0.0693
A ₃	0.1771	0.2292	0.1668	0.0599	0.2858	0.0455	0.0000	0.1926	0.0528	0.0000
A ₄	0.0590	0.0000	0.3336	0.4192	0.1715	0.4095	0.3171	0.0642	0.2111	0.4156
A ₅	0.0000	0.0573	0.2502	0.3593	0.2286	0.3640	0.3171	0.0642	0.1055	0.4156
A ₆	0.4132	0.2292	0.0834	0.2395	0.0572	0.1820	0.3806	0.0000	0.3694	0.1385
A ₇	0.3542	0.2292	0.4170	0.0599	0.4001	0.0000	0.3806	0.4494	0.4221	0.0693

Sledeći korak je formiranje otežane agregirane matrice odlučivanja. Nakon toga, određuju se sume svih kriterijuma po vrstama, zavisno od tipa kriterijuma. Drugim rečima, kao što AROMAN metoda sugerše, posebno se sabiraju kriterijumi tipa minimum, od tipa maximum. Rezultat ovog koraka predstavljen je u Tabeli 7.

Tabela 7. Otežana agregirana normalizovana matrica sa sumama prema tipu kriterijuma

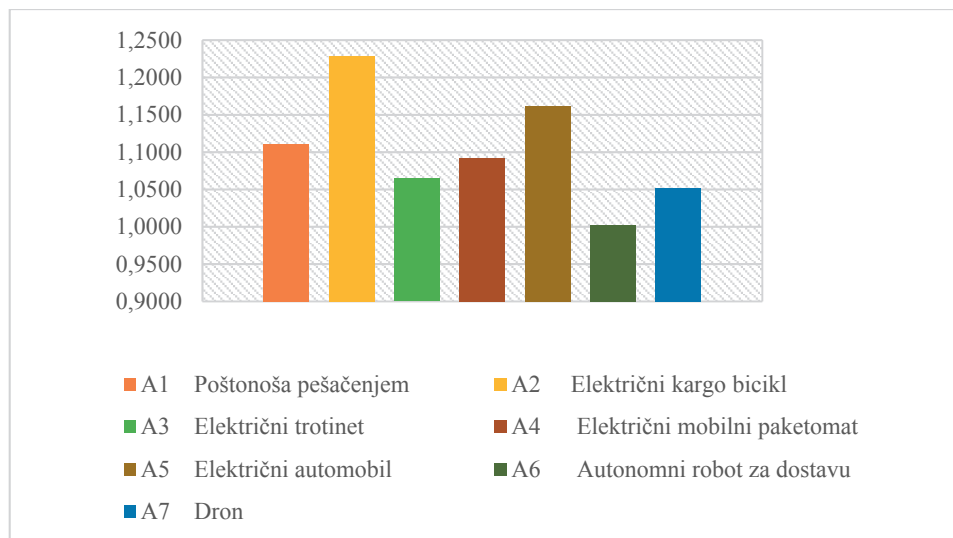
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	Li	Ai
A ₁	0.0273	0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0047	0.0076	0.0072	0.0000	0.0138	0.0273	0.0732
A ₂	0.0136	0.0342	0.0083	0.0076	0.0328	0.0283	0.0227	0.0286	0.0048	0.0069	0.0344	0.1536
A ₃	0.0205	0.0228	0.0166	0.0038	0.0273	0.0047	0.0000	0.0215	0.0048	0.0000	0.0457	0.0764
A ₄	0.0068	0.0000	0.0332	0.0267	0.0164	0.0424	0.0379	0.0072	0.0193	0.0414	0.0861	0.1453
A ₅	0.0000	0.0057	0.0249	0.0229	0.0219	0.0377	0.0379	0.0072	0.0097	0.0414	0.0575	0.1517
A ₆	0.0477	0.0228	0.0083	0.0153	0.0055	0.0189	0.0455	0.0000	0.0338	0.0138	0.1052	0.1064
A ₇	0.0409	0.0228	0.0415	0.0038	0.0383	0.0000	0.0455	0.0501	0.0387	0.0069	0.1250	0.1636
Min/Max	Min	Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Max		

Nakon ovog koraka, određuju se vrednosti Li^{\wedge} i Ai^{\wedge} kao i konačno rangiranje alternativa. Rezultati su prikazani u Tabeli 8.

Tabela 8. Konačno rangiranje alternativa

Li [^]	Ai [^]	Ai [^] -Li [^]	$e^{Ai^{\wedge}-Li^{\wedge}}$	Rang Alternativa
0.1652	0.2706	0.1054	1.1112	3
0.1855	0.3919	0.2064	1.2293	1
0.2138	0.2763	0.0625	1.0645	5
0.2934	0.3812	0.0877	1.0917	4
0.2398	0.3895	0.1498	1.1615	2
0.3243	0.3262	0.0020	1.0020	7
0.3535	0.4045	0.0510	1.0523	6

Kao što se može videti u Tabeli 8 i na Slici 2, najbolja alternativa za datu studiju slučaja je A_2 - *Električni kargo bicikl*. Celokupni rang alternativa je dat u sledećem opadajućem redosledu: $A_2 > A_5 > A_1 > A_4 > A_3 > A_7 > A_6$.



Slika 2. Konačan redosled alternativa

Dobijeni rezultati ukazuju na pogodnost primene modela dostave koji se zasniva na korišćenju kargo bicikala, za posmatranu teritoriju Beograda. Jedna od činjenica koja ide u prilog navedenom modelu jeste i da bicikli mogu pristupiti mestima koja su teško dostupna većim vozilima, kao što su uske i nepristupačne ulice, ulice sa manjkom parking mesta, pešačke zone i sl. Takođe, bicikli ne doprinose stvaranju saobraćajnih gužvi i smanjuju opterećenje saobraćajnih mreža, što je veoma značajno za gradske sredine. Važan uticajni aspekt ovog modela jeste i ekološka održivost, gde električni kargo bicikli ne proizvode emisije štetnih gasova. Ako analiziramo brzinu dostave korišćenjem ovih sredstava, usled postojanja električnog pogona, kao i relativno brzog parkiranja na lokaciji, možemo reći da je na visokom nivou. U poređenju sa tradicionalnim pristupom dostave gde se koriste transportna sredstva sa pogonom na fosilna goriva, električni bicikli imaju niže operativne troškove, uključujući i održavanje. Posmatrajući širi uticaj pristupa na životnu sredinu, pre svega na zdravlje ljudi, možemo govoriti o povećanoj svesti i boljoj kondiciji, usled intenzivnog korišćenja fizičke aktivnosti tokom vožnje.

Potrebno je naglasiti da je potvrđen značaj i ostalih modela, što je pokazatelj tendencija ka korišćenju alternativnih, održivih modela za dostavu pošiljaka. "Najlošije" su pozicionirane alternative koje podrazumevaju upotrebu najsavremenijih pristupa, odnosno korišćenje dronova i autonomnih robota. Jedan od osnovnih razloga za ovakav rezultat je u činjenici da su navedeni modeli u fazi razvoja i da još uvek postoje određena tehnička i tehnološka ograničenja u njihovoj primeni. Dodatno eksperti su još uvek u određenoj meri rezervisani kada je reč o njihovoj eksploataciji i pored činjenice da je u istraživačke svrhe usvojen stav o postojanju odgovarajuće regulative, koja u realnosti svakako predstavlja značajno ograničenje.

4. Zaključak

Održivo poslovanje predstavlja imperativ za svaku kompaniju iz bilo koje poslovne oblasti. Zasniva se na odgovornom delovanju u sve tri dimenzije održivosti – ekološkoj, društvenoj i ekonomskoj. Prateći ovaj koncept, kompanije mogu ostvariti značajne uspehe na tržištu. U radu su analizirani održivi modeli dostave, uzimajući u obzir definisane kriterijume, a u cilju izbora najpogodnijeg modela za deo teritorije Beograda. Naime, kroz saradnju sa ekspertima i primenom višekriterijumske analize, identifikovano je deset ključnih kriterijuma i sedam različitih alternativa dostave. Rezultati istraživanja ukazuju da je najpogodniji model za održivu dostavu na posmatranoj teritoriji onaj koji podrazumeva upotrebu električnih kargo bicikala. Ova odluka je doneta na osnovu sposobnosti modela da zadovolji sve postavljene kriterijume, uključujući održivost, ekonomske prednosti i praktičnost.

Dobijeni rezultati potvrđuju važnost korišćenja alternativnih modela dostave, posebno u urbanim sredinama gde su gužve i emisije štetnih gasova sve veći problem. Sistemi za dostavu pošiljaka će se i u budućnosti oblikovati u skladu sa fokusom na brzinu, efikasnost i održivost, dok će savremena tehnološka rešenja imati veliki značaj u tendenciji zadovoljenja potreba korisnika i unapređenja iskustva dostave.

Literatura

- [1] Švadlenka, L., Simić, V., Dobrodolac, M., Lazarević, D., & Todorović, G. (2020). Picture fuzzy decision-making approach for sustainable last-mile delivery. *IEEE Access*, 8, 209393-209414.
- [2] Simić, V., Lazarević, D., & Dobrodolac, M. (2021). Picture fuzzy WASPAS method for selecting last-mile delivery mode: a case study of Belgrade. *European Transport Research Review*, 13, 1-22.
- [3] Giuffrida, N., Fajardo-Calderin, J., Masegosa, A. D., Werner, F., Steudter, M., & Pilla, F. (2022). Optimization and machine learning applied to last-mile logistics: A review. *Sustainability*, 14(9), 5329.
- [4] Bošković, S., Švadlenka, L., Dobrodolac, M., Jovčić, S., & Zanne, M. (2023). An Extended AROMAN Method for Cargo Bike Delivery Concept Selection. *Decision Making Advances*, 1, 1-9.
- [5] Bošković, S., Švadlenka, L., Jovčić, S., Dobrodolac, M., Simić, V., & Bačanić, N. (2023b). An Alternative Ranking Order Method Accounting for Two-Step Normalization (AROMAN)–A Case Study of the Electric Vehicle Selection Problem. *IEEE Access*.
- [6] Yilmaz, Ş. F., Aktaş, N., & Demirel, N. (2022). Novel last mile delivery models in terms of sustainable urban logistics. *Journal of Turkish Operations Management*, 6(1), 1076-1091.
- [7] Mohammad, W. A., Nazih Diab, Y., Elomri, A., & Triki, C. (2023, April). Innovative solutions in last mile delivery: concepts, practices, challenges, and future directions. In *Supply Chain Forum: An International Journal* (Vol. 24, No. 2, pp. 151-169). Taylor & Francis.
- [8] Sorooshian, S., Khademi Sharifabad, S., Parsaee, M., & Afshari, A. R. (2022). Toward a modern last-mile delivery: Consequences and obstacles of intelligent technology. *Applied System Innovation*, 5(4), 82.

- [9] Balaska, V., Tsiakas, K., Giakoumis, D., Kostavelis, I., Folinas, D., Gasteratos, A., & Tzovaras, D. (2022). A Viewpoint on the Challenges and Solutions for Driverless Last-Mile Delivery. *Machines*, 10(11), 1059.
- [10] Kader, M. S., Rashaduzzaman, M., Huang, X., & Kim, S. (2023). Influencing factors toward e-shoppers' adoption of green last-mile delivery. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 51(2), 220-237.
- [11] Vrhovac, V., Vasić, S., Milisavljević, S., Dudić, B., Štarchoň, P., & Žižakov, M. (2023). Measuring E-Commerce User Experience in the Last-Mile Delivery. *Mathematics*, 11(6), 1482.
- [12] Eskandaripour, H., & Boldsai Khan, E. (2023). Last-mile drone delivery: Past, present, and future. *Drones*, 7(2), 77.
- [13] Yalçın, G. C., Kara, K., Toygar, A., Simic, V., Pamucar, D., & Köleoğlu, N. (2023). An intuitionistic fuzzy-based model for performance evaluation of EcoPorts. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107192.
- [14] Nikolić, I., Milutinović, J., Božanić, D., & Dobrodolac, M. (2023). Using an Interval Type-2 Fuzzy AROMAN Decision-Making Method to Improve the Sustainability of the Postal Network in Rural Areas. *Mathematics*, 11(14), 3105.
- [15] Čubranić-Dobrodolac, M., Jovčić, S., Bošković, S., & Babić, D. (2023). A Decision-Making Model for Professional Drivers Selection: A Hybridized Fuzzy–AROMAN–Fuller Approach. *Mathematics*, 11(13), 2831.
- [16] Rani, P., Mishra, A. R., Alrasheedi, A. F., Xie, B., & DWIVEDI, R. (2023). Evaluating the Sustainable Human Resource Management in Manufacturing Firms Using Single-Valued Neutrosophic Distance Measure-Based RANCOM-AROMAN Model.
- [17] Lazarević, D. (2020). Upravljanje kvalitetom poštanske usluge primenom geometrijskog modeliranja. Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet.

Abstract: *The development of e-commerce has resulted in an increase in the number of shipments in delivery systems. Delivery companies aim to respond to this emerging situation, satisfy customer needs, and achieve profitability by optimizing their operations. An imperative is the establishment of a delivery system that aligns with the principles of sustainable development. This paper defines the task of selecting a sustainable delivery model for shipments and proposes the AROMAN method for its resolution. The applicability of the proposed method is demonstrated through an example of solving the defined task in the territory of the city of Belgrade.*

Keywords: *e-commerce, technological development, sustainable delivery models, multi-criteria analysis.*

SELECTING A SUSTAINABLE DELIVERY MODEL USING AROMAN MULTI-CRITERIA ANALYSIS

Momčilo Dobrodolac, Sara Bošković, Stefan Jovčić, Dragan Lazarević

**TELEKOMUNIKACIONI
SAOBRAĆAJ, MREŽE I
SERVISI**

BEZBEDNOST SDN MREŽA: PROBLEMI I MOGUĆA REŠENJA

Mirjana Stojanović, Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, Momir Manović
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

m.stojanovic@sf.bg.ac.rs, a.kostic@sf.bg.ac.rs, m.manovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: Razvoj interneta omogućio je komunikaciju između korisnika u realnom vremenu i prenos velikih količina podataka za kratak vremenski period. Međutim, eksponencijalni rast broja korisnika doveo je do kompleksnosti mreže, što je uslovalo greške u konfiguraciji i probleme optimizacije mreže. Softverski definisano umrežavanje donosi novu ideju o upravljanju mrežom sa jedne centralizovane lokacije. Ovaj način pojednostavljuje proces konfiguracije i olakšava optimizaciju mreže. Upravljanje mrežom sa jedne lokacije donosi brojne prednosti, ali i mane. Najveća prednost ove arhitekture je ujedno i njen najveći nedostatak. Otkaz entiteta koji vrši upravljanje mrežom može dovesti do potpunog otkaza mreže. U ovom radu prikazani su bezbednosni problemi ove arhitekture kao i moguća rešenja.

Ključne reči: *Softverski definisano umrežavanje, OpenFlow, Denial of Service, Spoofing*

1. Uvod

Postoje različite definicije softverski definisanog umrežavanja (*Software Defined Networking*, SDN). U ovom radu korišćena je definicija koju daje *Open Networking Foundation* (ONF) i koja je najbliža inicijalnoj ideji SDN mreže koja je nastala na univerzitetu u Stanfordu. ONF definiše SDN kao razdvajanje kontrolne ravni od ravni podataka, gde se kontrola mreže vrši sa centralizovane lokacije.

Ova konfiguracija mreže razlikuje se od tradicionalnog načina umrežavanja, gde se svi uređaji u mreži konfigurišu posebno i svaki od njih ima određenu autonomiju. Za razliku od tradicionalne mreže, gde uređaji međusobno razmenjuju kontrolne poruke i donose odluke na osnovu algoritama implementiranih u pojedinačnim uređajima, u SDN mreži sve kontrolne poruke se prosleđuju centralnom entitetu, koji se naziva kontroler. Kontroler donosi odluke u mreži i na taj način oduzima autonomiju krajnjim uređajima koji postaju samo uređaji za prosleđivanje na osnovu pravila koje odredi kontroler.

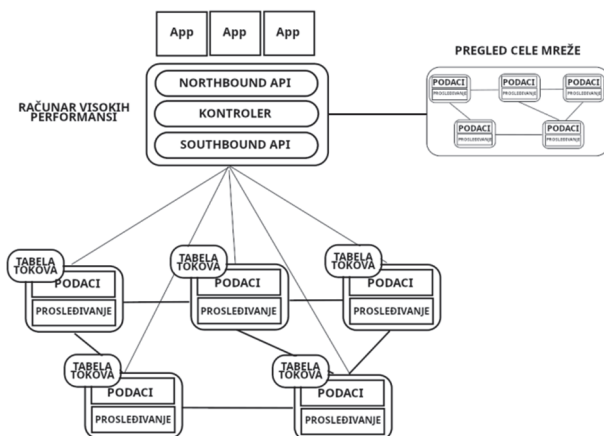
Kontroler je zapravo sloj apstrakcije između krajnjih uređaja i aplikacija koje koriste informacije prikupljene u kontroleru za implementaciju algoritama. Ovakva arhitektura pruža fleksibilnost, jer programeri ne moraju da poznaju hardverske detalje krajnjih uređaja, što značajno olakšava proces kreiranja novih aplikacija.

Interfejs koji kontroler koristi za komunikaciju sa krajnjim uređajima naziva se *Southbound* interfejs, a protokol koji se najčešće koristi za komunikaciju kontrolera i uređaja je *OpenFlow*. Prva verzija *OpenFlow* protokola izašla je 2009. godine, a trenutna verzija je 1.5.1. Specifikacije *OpenFlow* protokola se nalaze na sajtu ONF [1]. Drugi interfejs koji kontroler koristi za komunikaciju sa aplikacijama naziva se *Northbound* interfejs i još uvek ne postoji jasno definisan standard komunikacije za ovaj interfejs.

Centralizovana arhitektura pruža nove mogućnosti, međutim ima i određene nedostatke. U ovom radu prikazane su posledice koje centralizovana struktura ima na bezbednost mreže. Dati su primeri problema u SDN mrežama, kao i moguća rešenja.

2. Princip rada SDN mreže

Na slici 1 prikazan je primer SDN mreže. Nakon povezivanja uređaja sa kontrolerom uspostavlja se TCP (*Transmission Control Protocol*) sesija između uređaja i kontrolera. *OpenFlow* koristi tu sesiju za razmenu informacija sa krajnjim uređajem.



Slika 1. Primer jednostavne SDN mreže

U uređajima za prosleđivanje nalaze se tabele tokova koje konfiguriše kontroler. Svaki ulaz u tabeli toka ima bar tri vrednosti. Prva vrednost definiše na osnovu čega će se vršiti selekcija dolaznih tokova. Ovo polje najčešće sadrži IP (*Internet Protocol*) adrese izvora ili odredišta ili MAC (*Medium Access Control*) adrese izvora ili odredišta. Druga vrednost definiše akciju koja treba da bude izvršena nad tokom koji je zadovoljio kriterijum definisan u prvoj vrednosti. Najčešće akcije su odbacivanje paketa i prosleđivanje na određeni port. Treća vrednost predstavlja brojač koji se uvećava ukoliko dođe do poklapanja dolaznog toka sa tokom definisanim u tabeli. Ova vrednost se najčešće koristi kao statistički parametar ili kao vrednost na osnovu koje se vrši tarifiranje saobraćaja.

Tabele tokova mogu se definisati proaktivno i reaktivno. Proaktivna konfiguracija podrazumeva dodavanje tokova u tabele preko aplikacije. Reaktivna konfiguracija podrazumeva slučaj kada uređaj za prosleđivanje primi tok za koji nema definisanu vrednost u tabeli. U tom slučaju tok se prosleđuje kontroleru koji donosi

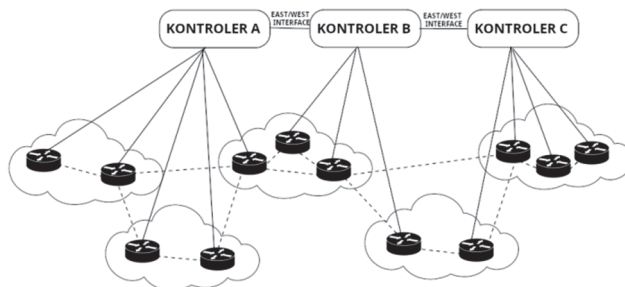
odluku šta treba uraditi. Nakon donete odluke kontroler implementira novi tok u tabelu toka uređaja, tako da u budućnosti ukoliko uređaj primi isti tok ne mora da kontaktira kontroler. Proaktivna konfiguracija je efikasnija jer nema razmene informacija sa kontrolerom, međutim u praksi nije moguće znati sve tokove koji se nalaze u mreži, pa je reaktivna konfiguracija češća.

3. Pouzdanost kontrolera

U osnovi kontroler je server pokrenut na računaru visokih performansi koji preko TCP sesije komunicira sa krajnjim uređajima. Postavlja se pitanje šta se dešava sa mrežom u slučaju otkaza kontrolera. U prethodnom poglavlju je navedeno da krajnji uređaji nisu u stanju samostalno da donose odluke i iz tog razloga *OpenFlow* definiše dva stanja u koja uređaj ulazi u slučaju otkaza: (1) *Fail-secure* mod i (2) *Fail-standalone* mod.

Ukoliko je uređaj definisan tako da u slučaju gubitka TCP veze sa kontrolerom uđe u *fail-secure* mod, on prosleđuje saobraćaj za koji ima definisana pravila u tabeli tokova. Saobraćaj za koji je neophodna komunikacija sa kontrolerom biće odbačen. *Fail-standalone* mod podrazumeva da je uređaj hibridni tj. da podržava *OpenFlow* prosleđivanje i tradicionalni način prosleđivanja. U ovom slučaju ukoliko dođe do prekida veze uređaj se prebacuje na tradicionalni način prosleđivanja.

Centralizovana struktura je pogodna za napade na sistem jer jasno definiše tačku otkaza celog sistema. Ono što dodatno stvara problem u SDN mrežama je reaktivna priroda SDN mreže. U slučaju velikog broja zahteva može doći do pada kontrolera. Jedno od najčešćih rešenja je distribuirana struktura kontrolera. Primer ove strukture je prikazan na slici 2. Ovakva struktura omogućava više kontrolera koji su zaduženi za upravljanje delom mreže. Ukoliko dođe do otkaza jednog, drugi kontroler može da preuzme kontrolu. Međutim u slučaju napada na kontroler ovo rešenje nije najbolje, jer ceo saobraćaj sa jednog kontrolera se prenosi na drugi, što kao posledicu ima redno padanje svih kontrolera. U nastavku rada prikazana su neka od rešenja ovog problema.



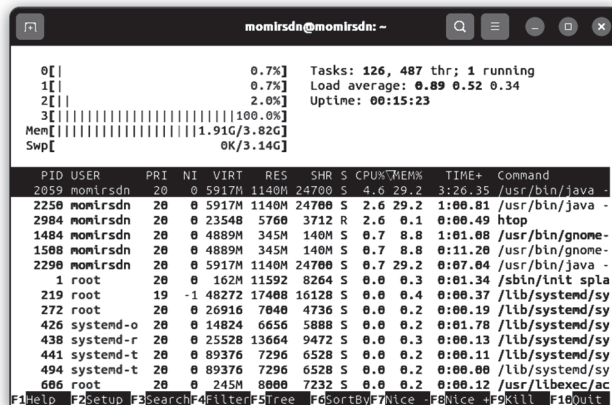
Slika 2. Distribuirana struktura kontrolera

4. DoS napadi

DoS (*Denial of Service*) napadi su napadi gde zlonamerni korisnik generiše saobraćaj kako bi stvorio zagušenje u mreži i preopteretio kontroler. U slučaju SDN

mreže najgora posledica je pad kontrolera, dok je najčešća narušavanje kvaliteta servisa. Karakteristike navedene u prethodnom poglavlju čine DoS napade vrlo efikasnim. Napadač koji se nalazi u mreži može izvršiti različite DoS napade [2-4].

Najjednostavniji napadi su generisanje velike količine TCP SYN paketa koji zahtevaju uspostavljanje TCP sesije. Nakon odgovora servera, napadač bi poslao RST poruku koja resetuje konekciju. Drugi tip poruka koje se često šalju u DoS napadima su ICMP (*Internet Control Message Protocol*) poruke. Ovi napadi dovode do povećanog korišćenja resursa, međutim retko mogu dovesti do potpunog otkaza servisa. Najčešća posledica ovih napada je smanjenje kvaliteta servisa. Na slici 3 je prikazana iskorišćenost resursa na serveru nakon pokretanja DoS napada koristeći ICMP pakete. Za napad je korišćen *hping3* alat, a komanda je: **hping3 -icmp <adresa kontrolera>**.



Slika 3. Iskorišćenost resursa na serveru

Rezultat prikazan na slici 3 pokazuje da pokretanje jednostavnog DoS napada sa jednog računara u mreži dovodi do iskorišćenja celog jezgra procesora na serveru. Ovi napadi su znatno opasniji za uređaje koji nemaju dovoljno hardverskih resursa i za aplikacije koje ne koriste paralelne procese. Uticaj koji je ovaj DoS napad imao na kvalitet servisa prikazan je na slikama 4 i 5.

```
--- 192.168.122.53 ping statistics ---
40 packets transmitted, 40 received, 0% packet loss, time 39115ms
rtt min/avg/max/mdev = 1.226/3.048/7.894/1.440 ms
```

Slika 4. Statistike normalnog rada mreže

```
--- 192.168.122.53 ping statistics ---
40 packets transmitted, 38 received, 5% packet loss, time 39078ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.497/5.463/22.378/5.568 ms
```

Slika 5. Statistike mreže u toku DoS napada

Kao način provere uticaja napada, korišćene su ICMP poruke koje korisnik šalje pri normalnom funkcionisanju mreže i za vreme napada. Rezultati pokazuju da je

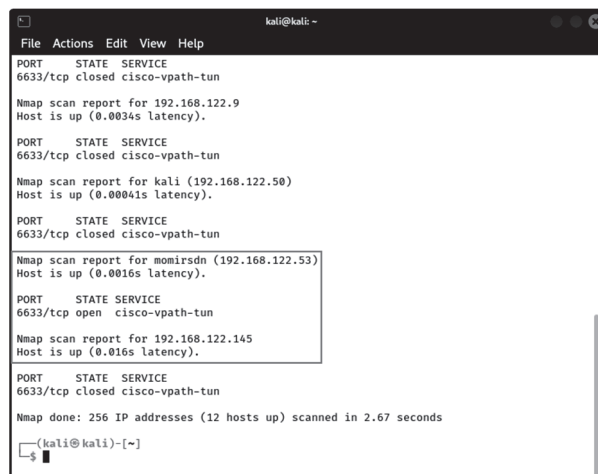
prosečno kašnjenje odgovora servera povećano sa 3,048 ms na 5,463 ms, a broj izgubljenih paketa je povećan sa 0 izgubljenih u prvom slučaju na 2 izgubljena u drugom, za uzorak od 40 paketa.

Još jedna vrsta DoS napada koja je moguća u SDN mrežama je slučaj u kome napadač šalje pakete u mrežu sa slučajnom izvorišnom i odredišnom IP adresom. Pošto uređaji za prosleđivanje nemaju informaciju šta da rade sa paketom, ceo saobraćaj se prosleđuje kontroleru. Ova situacija može dovesti do preopterećenja kontrolera i posledica je reaktivne prirode o kojoj je bilo reči u prethodnom poglavlju.

4.1. Specijalizovani DoS napadi

Specijalizovani DoS napadi su značajno opasniji, jer napadač eksploatiše mane u implementaciji kontrolera ili aplikacije. Da bi napad bio izvršen, prvo je nophodno prikupiti informacije. Primer procesa prikupljanja informacija biće prikazan u simulacionom okruženju *Mininet*.

OpenFlow specifikacija definiše TCP port 6633 kao port komunikacije kontrolera sa uređajima. Napadač koji se nalazi u mreži, korišćenjem *nmap* alata može da otkrije koji uređaj u mreži je kontroler. Komandom **nmap -p 6633 192.168.122.0/24** napadač definiše mrežu u kojoj želi da izvrši skeniranje na specifičnom portu. Rezultati skeniranja su prikazani na slici 6.



```
kali@kali ~  
File Actions Edit View Help  
PORT      STATE SERVICE  
6633/tcp   closed cisco-vpath-tun  
  
Nmap scan report for 192.168.122.9  
Host is up (0.0034s latency).  
  
PORT      STATE SERVICE  
6633/tcp   closed cisco-vpath-tun  
  
Nmap scan report for kali (192.168.122.50)  
Host is up (0.00041s latency).  
  
PORT      STATE SERVICE  
6633/tcp   closed cisco-vpath-tun  
  
Nmap scan report for momirsdn (192.168.122.53)  
Host is up (0.0016s latency).  
  
PORT      STATE SERVICE  
6633/tcp   open  cisco-vpath-tun  
  
Nmap scan report for 192.168.122.145  
Host is up (0.016s latency).  
  
PORT      STATE SERVICE  
6633/tcp   closed cisco-vpath-tun  
  
Nmap done: 256 IP addresses (12 hosts up) scanned in 2.67 seconds  
  
(kali@kali)-[~]  
└─$
```

Slika 6. Rezultati komande **nmap -p 6633 192.168.122.0/24**

Na slici 6 se vidi da je host sa IP adresom 192.168.122.53 kontroler, jer je stanje njegovog porta sa brojem 6633 otvoreno. Nakon ove pretrage, napadač pokreće detaljniju pretragu koje je koncentrisana na host sa datom IP adresom. Kako bi saznao ostale servise koje host pokreće, napadač koristi komandu **nmap -sV 192.168.122.53**. Rezultati ove komande prikazani su na slici 7.

Na slici 7 se vidi da napadač dobija informacije o drugim servisima pokrenutim na kontroleru, kao i verzijama servisa. Nakon pretraživanja baza podataka o ranjivostima ove verzije *Java* servera napadač može pronaći specifične napade. Na adresi [5] mogu se

videti ranjivosti karakteristične za ovu verziju. Jedna od ranjivosti je loše upravljanje resursima pri obradi velikih TLS (*Transport Layer Security*) paketa. Kako bi ovi napadi bili sprečeni neophodno je redovno ažuriranje softvera.

```
(kali@kali)-[~]
└─$ nmap -sV 192.168.122.53
Starting Nmap 7.94 ( https://nmap.org ) at 2023-09-27 08:53 EDT
Nmap scan report for momirsdn (192.168.122.53)
Host is up (0.00032s latency).
Not shown: 997 closed tcp ports (conn-refused)
PORT      STATE SERVICE      VERSION
1099/tcp  open  java-rmi     Java RMI
8080/tcp  open  http         Jetty 8.1.19.v20160209
8181/tcp  open  http         Jetty 8.1.19.v20160209

Service detection performed. Please report any incorrect results at https://nmap.org/su
bmit/.
Nmap done: 1 IP address (1 host up) scanned in 6.34 seconds

(kali@kali)-[~]
└─$
```

Slika 7. Rezultati komande `nmap -sV 192.168.122.53`

4.2. Rešavanje problema DoS napada

DoS napadi su najčešća vrsta napada u SDN mrežama. Razlog za to je jednostavnost izvođenja napada koji može dovesti do ozbiljnih posledica u mreži. Postoji veliki broj radova koji se bave ovim problemom [6]. Rešenja se najčeće baziraju na više kontrolera i raspodeli saobraćaja između kontrolera, kao i mogućnosti preuzimanja uloge glavnog kontrolera ukoliko dođe do otkaza [7]. Rešenje koje je prikazano u radu [8] predlaže dinamičko kreiranje i uklanjanje kontrolera u zavisnosti od opterećenja. Istraživanje [9] je pokazalo da u slučaju korišćenja više kontrolera u mreži, ukoliko imamo heterogene kontrolere, sistem postaje otporniji. Razlog ovoga je što različite implementacije kontrolera različito reaguju na napade. Pored ovih rešenja moguće je implementirati i aplikacije zasnovane na mašinskom učenju koje detektuju ne samo napade na kontroler, već i napade na hostove koji se nalaze u mreži [10].

5. Spoofing napadi u mreži

Još jedna česta vrsta napada u SDN mrežama su napadi lažiranja adresa. U ovom slučaju napadač eksploatiše način prosleđivanja koji koriste uređaji. Politika koja se koristi za prosleđivanje zavisi od implementacije kontrolera.

Za primer prikazan u radu korišćen je *OpenDaylight* kontroler. Politika prosleđivanja ovog kontrolera se bazira na izvorišnoj i odredišnoj MAC adresi. Na slici 8 prikazani su ulazi tabele tokova jednog od uređaja. Označeni tok sa slike 8 pokazuje da paket sa izvorišnom MAC adresom 00:00:00:00:00:01 i odredišnom MAC adresom 00:00:00:00:00:02 treba da bude prosleđen na port 2. Napadač koji poznaje politiku prosleđivanja kontrolera može statički da konfiguriše svoju MAC adresu i da je postavi

na vrednost MAC adrese drugog hosta u mreži. Vrednost te adrese može pronaći u ARP (*Address Resolution Protocol*) tabeli u kojoj se nalaze adrese svih uređaja u mreži sa kojim je komunicirao.

```
mininet@mininet-vn:~$ sudo ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-flows s2
OFPT_FLOW reply (OF1.3) (xid=8x2):
 cookie=0x2b0000000000000c, duration=949.555s, table=0, n_packets=356, n_bytes=30260, priority=100,d_l_type=0x88cc actions=CONTROLLER
:65535
 cookie=0x2a00000000000000, duration=213.372s, table=0, n_packets=7, n_bytes=574, idle_timeout=600, hard_timeout=300, priority=10,d_l
src=00:00:00:00:00:01,d_l_dst=00:00:00:00:00:02 actions=output:2
 cookie=0x2a00000000000001, duration=213.372s, table=0, n_packets=22, n_bytes=1652, idle_timeout=600, hard_timeout=300, priority=10,
d_l_src=00:00:00:00:00:02,d_l_dst=00:00:00:00:00:01 actions=output:1
 cookie=0x2a00000000000002, duration=213.372s, table=0, n_packets=2, n_bytes=140, idle_timeout=600, hard_timeout=300, priority=10,d_l
_src=00:00:00:00:00:01,d_l_dst=00:00:00:00:00:03 actions=output:3
 cookie=0x2a00000000000003, duration=213.372s, table=0, n_packets=13, n_bytes=938, idle_timeout=600, hard_timeout=300, priority=10,d
```

Slika 8. Tabela toka uređaja pre napada

Na *Linux* operativnim sistemima statička konfiguracija MAC adrese se vrši pomoću *ip* komande. Prvo je potrebno administrativno ugasiti interfejs na kome se vrši izmena adrese komandom **sudo ip link set dev <naziv interfejsa> down**. Zatim se postavlja MAC adresa na željenu vrednost komandom **sudo ip link set dev <naziv interfejsa> address <željena adresa>**. Nakon toga je potrebno administrativno pokrenuti interfejs komandom **sudo ip link set dev <naziv interfejsa> up**. Nakon podizanja interfejsa napadač će slati poruke za izvorišnom adresom koja je konfigurisana.

Ova konfiguracija je pokrenuta u simulacionom okruženju *Mininet* gde napadač generiše beskoristan saobraćaj sa određišnom MAC adresom 00:00:00:00:00:02. Na slici 9 vidimo rezultat u tabeli toka. Vrednost broja paketa i prenetih bajtova se uvećala za dati tok. Ovo stvara veliki problem u situacijama gde se vrednosti iz tabela tokova koriste za tarifiranje saobraćaja u mreži.

```
mininet@mininet-vn:~$ sudo ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-flows s2
OFPT_FLOW reply (OF1.3) (xid=8x2):
 cookie=0x2b0000000000000c, duration=1392.214s, table=0, n_packets=445, n_bytes=37825, priority=100,d_l_type=0x88cc actions=CONTROLLER
R:65535
 cookie=0x2a00000000000002, duration=99.092s, table=0, n_packets=57051, n_bytes=3423060, idle_timeout=600, hard_timeout=300, priority=10,d_l
src=00:00:00:00:00:01,d_l_dst=00:00:00:00:00:02 actions=output:2
 cookie=0x2a00000000000003, duration=99.092s, table=0, n_packets=48674, n_bytes=2044308, idle_timeout=600, hard_timeout=300, priority=10,d_l
src=00:00:00:00:00:02,d_l_dst=00:00:00:00:00:01 actions=output:1
 cookie=0x2b00000000000003, duration=1386.897s, table=0, n_packets=3193, n_bytes=246612, priority=2,in_port=4 actions=output:3,output:
t:2,output:1
```

Slika 9. Tabela toka uređaja posle napada

5.1. Rešenja *Spoofing* napada

Spoofing napadi su posledica neregularnog stanja u mreži. Kako bi ovaj problem bio rešen potrebno je razviti aplikaciju koja proverava regularnost mreže.

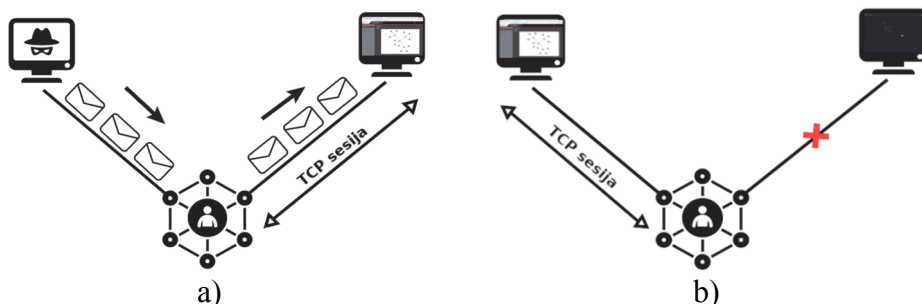
Problem koji je prikazan javlja se jer u mreži postoje dva uređaja sa istom MAC adresom. Uređaj za prosleđivanje koji primi istu MAC adresu na dva različita porta treba da detektuje neregularno stanje. Ovo stanje može biti posledica petlje u mreži ili lažiranja MAC adrese. Ako pretpostavimo da je u mreži pokrenut algoritam za sprečavanje petlji, uređaj mora preduzeti akcije kako bi sprečio napade lažiranja adrese. Jedna od mogućih akcija je autentifikacija korisnika na osnovu sertifikata.

6. Problem autentifikacije

Specifikacija *OpenFlow* verzije 1.0 zahteva da kanal komunikacije između kontrolera i uređaja bude šifrovan pomoću TLS protokola. Međutim, kasnije verzije su ovu mogućnost definisale kao opcionu. Kao posledicu ovoga imamo veliki broj mreža koje ne implementiraju TLS konekciju zbog dodatne kompleksnosti i *overheada* koji se unosi u sistem. Ove implementacije stvaraju dodatne ranjivosti u mreži zbog nepostojanja autentifikacije krajnjih tačaka i šifrovanja komunikacije.

Na sledećem primeru biće prikazan način na koji napadač može da iskoristi nedostatak autentifikacije u SDN mreži. Primer je realizovan u *Mininet* okruženju. Uređaji za prosleđivanje koje *Mininet* koristi su softverski svičevi koji podržavaju *OpenFlow* [11]. Svaki svič ima konfigurisanu IP adresu kontrolera.

Ideja koju napadač ima je da izvrši napad direktno na kontroler koji bi doveo do pada interfejsa. Nakon toga statički bi konfigurisao svoju IP adresu kao adresu kontrolera i pokrenuo svoj kontroler. Svičevi nakon što detektuju prekid TCP sesije pokreću proces ponovne uspostave veze. Nakon što statički konfigurise IP adresu i pokrene kontroler napadač dobija zahtev za uspostavu TCP sesije i na taj način preuzima kontrolu nad mrežom. Na slikama 10 a) i 10 b) prikazan je princip napada. Mogućnost ovog napada je posledica nedostatka autentifikacije.



Slika 10. a) Napad na interfejs kontrolera; b) Preuzimanje kontrole nad mrežom

6.1. Rešenja problema autentifikacije

Problem autentifikacije je jedan od najvećih problema u SDN mreži. Razlog za to su posledice u slučaju uspešnog napada. Kao prvo rešenje ovog problema nameće se implementacija digitalnih sertifikata. Server bi pre uspostave veze morao da pošalje digitalni sertifikat potpisan svojim privatnim ključem. Uređaj bi proverio integritet sertifikata i izvršio autentifikaciju servera. Na ovaj način nije moguće jednostavno pokrenuti kontroler na drugom računaru i preuzeti mrežu kao što je prikazano u prethodnom primeru. Postoje i druga rešenja koja su data u radovima [12-14].

Takođe *OpenFlow* definiše dva tipa komunikacije između kontrolera i uređaja koji imaju značajan uticaj na bezbednost, a to su: (1) IN BAND komunikacija i (2) OUT OF BAND komunikacija. IN BAND komunikacija podrazumeva da se kontroler može povezati na bilo koji port u ravni podataka i preko njega konfigurisati mrežu. Za razliku od toga, OUT OF BAND komunikacija definiše port namenjen isključivo za komunikaciju sa kontrolerom, koji je odvojen od ravni podataka. OUT OF BAND

komunikacija je bezbednija opcija, ali ima veću kompleksnost implementacije. U slučaju da neki kontroler pokuša uspostavu veze na portu u ravni podataka uređaj bi ga odbio.

7. Zaključak

Zbog čestih sajber napada, pitanje bezbednosti je postalo jako važno u savremenim mrežavama. Napadači poznaju mogućnosti eksploatacija mana u mreži na različitim nivoima i iz tog razloga je neophodno voditi računa o svim aspektima bezbednosti. Počevši od fizičke bezbednosti opreme, zatim protokola koji se koriste u mreži i na kraju, potrebno je voditi računa o bezbednosti aplikacija.

Softverski definisano umrežavanje pruža novi koncept upravljanja mrežom koji donosi fleksibilnost i jednostavnost. Ovakav način konfigurisanja mreže omogućava automatizaciju, uvid u sva dešavanja u mreži i brze reakcije na promene. Ovo su prednosti koje donosi upravljanje sa jedne centralizovane lokacije u odnosu na tradicionalni način upravljanja. Međutim, centralizovana arhitektura ima i svoje nedostatke. Kao što je napomenuto u radu, centralni entitet predstavlja tačku otkaza celog sistema, što kao posledicu ima česte napade na njega.

Velika prednost softverski definisanog umrežavanja je mogućnost relativno lakog razvoja aplikacija koje mogu koristiti informacije iz mreže za odbranu od napada. Ako na to dodamo i otvorenost standarda, dobijamo veliki broj rešenja za probleme u mreži koji se mogu jednostavno implementirati pokretanjem aplikacije na kontroleru.

Literatura

- [1] OpenFlow Switch Specification Version 1.5.1, 2015, [Online]. Available at: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.1.pdf>
- [2] M. Sinha, P. Bera and M. Satpathy, "DDoS Vulnerabilities Analysis in SDN Controllers: Understanding the Attacking Strategies," *2023 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WiSPNET57748.2023.10134518.
- [3] J. R. Dora and L. Hluchy, "Detection of Attacks in Software-Defined Networks (SDN)* : *How to conduct attacks in SDN environments," *2023 IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, Timisoara, Romania, 2023, pp. 000623-000630, doi: 10.1109/SACI58269.2023.10158584.
- [4] P. Ohri, S. G. Neogi and S. K. Muttou, "Security Analysis of Open Source SDN (ODL and ONOS) Controllers," *2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/SCEECS57921.2023.10063108.
- [5] Eclipse Jetty 8.1.19 20160209 : Security Vulnerabilities, [Online] Available at: https://www.cvedetails.com/vulnerability-list/vendor_id-10410/product_id-34824/version_id-613689/Eclipse-Jetty-8.1.19.html
- [6] M. Priyadarsini, P. Bera, S. K. Das and M. A. Rahman, "A Security Enforcement Framework for SDN Controller Using Game Theoretic Approach," in *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 20, no. 2, pp. 1500-1515, 1 March-April 2023, doi: 10.1109/TDSC.2022.3158690.

- [7] R. DeLany, A. Smith, Y. Li and L. Du, "SDN Dynamic Controller Configuration to Mitigate Compromised Controllers," *2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Detroit, MI, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ITEC55900.2023.10186974.
- [8] M. -H. Cheng, W. -S. Hwang, Y. -J. Wu, Y. -T. Guo and M. C. Chen, "A Dynamic VNF Deployment to Avoid Controller Overload in SDN-Cluster," *2023 9th International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*, Chiba, Japan, 2023, pp. 241-243, doi: 10.1109/ICASI57738.2023.10179536.
- [9] P. Yi *et al.*, "A safe and reliable heterogeneous controller deployment approach in SDN", in *China Communications*, vol. 18, no. 8, pp. 47-61, Aug. 2021, doi: 10.23919/JCC.2021.08.004.
- [10] A. Hamarshe, H. I. Ashqar, M. Hamarsheh. "Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networking Using Machine Learning Models." *International Conference on Advances in Computing Research*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.
- [11] Open vSwitch, 2016, [Online] Available at: <https://www.openvswitch.org/features/>
- [12] U. Tupakula, K. K. Karmakar, V. Varadharajan and B. Collins, "Implementation of Techniques for Enhancing Security of Southbound Infrastructure in SDN," *2022 13th International Conference on Network of the Future (NoF)*, Ghent, Belgium, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/NoF55974.2022.9942644.
- [13] A. Bhardwaj and H. Mutaheer, "Secure Host Login Technique based Key Agreement protocol for Software Defined Network," *2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, Coimbatore, India, 2022, pp. 640-645, doi: 10.1109/ICIRCA54612.2022.9985755.
- [14] H. Mutaheer and P. Kumar, "Security-Enhanced SDN Controller Based Kerberos Authentication Protocol," *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, Noida, India, 2021, pp. 672-677, doi: 10.1109/Confluence51648.2021.9377044.

Abstract: *The development of the Internet enabled communication between users in real time and the transfer of large amounts of data in a short period of time. However, the exponential growth of the number of users led to network complexity, which caused configuration errors and network optimization problems. Software-defined networking brings a new idea of network management from one centralized location. This mode simplifies the configuration process and facilitates network optimization. Managing the network from one location brings numerous advantages, but also disadvantages. The biggest advantage of this architecture is also its biggest disadvantage. The failure of the entity that manages the network can lead to a complete failure of the network. This paper presents the security problems of this architecture as well as possible solutions.*

Keywords: *Software-Defined Networking, OpenFlow, Denial of Service, Spoofing*

SDN NETWORK SECURITY: PROBLEMS AND POSSIBLE SOLUTIONS

Mirjana Stojanović, Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, Momir Manović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.012>

PROGNOZIRANJE INTENZITETA *BRUTE-FORCE* NAPADA U FUNKCIJI OPTIMIZACIJE NIVOA ZAŠTITE

Slobodan Mitrović, Valentina Radojičić, Goran Marković
University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic Engineering
s.mitrovic@sf.bg.ac.rs, valentin@sf.bg.ac.rs, g.markovic@sf.bg.ac.rs

Sadržaj: *Brute-force napadi predstavljaju opasnost za širok spektar online sistema i njihovih naloga što uključuje računare, mreže, servere i online servise. Fail2Ban kao adekvatan odgovor na ovu vrstu napada može postići različitu efikasnost zaštite u zavisnosti od primenjene bezbednosne polise. Stroga polisa zaštite u Fail2Ban-u može imati brojne implikacije, uključujući povećano opterećenje serverskih resursa i smanjenu dostupnost servisa ka korisnicima. Nasuprot tome, previše relaksirana polisa zaštite je "prijateljski nastrojena" ka korisnicima i smanjuje opterećenje resursa, ali utiče na povećanu verovatnoću kompromitovanja korisničkih akreditiva. Kao kompromis, nameće se izbor polisa zaštite koje pripadaju klasi tzv. balansiranih polisa. U ovom radu dat je akcenat na izbor balansirane bezbednosne polise, na osnovu prognoziranih vrednosti intenziteta brute-force napada primenom Holt-Winters metode. Eksperimentalni rezultati dobijeni su na osnovu podataka za nadzor rada serverskih sistema Saobraćajnog fakulteta.*

Ključne reči: *brute-force napadi, Fail2Ban servis, bezbednosna polisa, prognoziranje, Holt-Winters metoda*

1. Uvod

U digitalnom svetu, gde su kritične informacije i usluge permanentno dostupne putem interneta, bezbednost sistema predstavlja jedan od najznačajnijih izazova, bez obzira da li se digitalne aktivnosti odnose na savremeno poslovanje, ili su vezane za svakodnevni život. Bezbednost sistema može se posmatrati kao sposobnost sistema da aktivira adekvatan bezbednosni odgovor na pojavu različitih vrsta pretnji. U tom kontekstu, jedan od čestih oblika pretnji po bezbednost sistema je tzv. *brute-force* napad. Ova vrsta sajber napada bazira se na namernom napadaču da dobije neovlašćeni pristup posmatranom sistemu ili nalogu metodom velikog broja uzastopnih pokušaja unosa kombinacija korisničkih imena i lozinki. Napadači mogu da koriste automatizovane alate da isprobaju hiljade ili čak milione različitih akreditiva za prijavu u veoma kratkom roku. Uprkos njihovoj naizgled jednostavnoj metodologiji, *brute-force* napadi predstavljaju efikasnu tehniku sajber napada, koja kao pojava u domenu sajber bezbednosti ima trajni karakter.

Da bi se zaštitili od ovakve vrste napada, administratori i stručnjaci za sajber bezbednost koriste različite alate i tehnike [1]. Među njima se nalazi se i *Fail2Ban* [2], softver za prevenciju upada otvorenog koda, koji je ocenjen kao efikasan odbrambeni mehanizam. *Fail2Ban* funkcioniše tako što u realnom vremenu nadgleda *log* datoteke, tragajući za obrascima aktivnosti koji ukazuju na ponovljene neuspele pokušaje prijavljivanja i potom preduzima mere za sprečavanje daljeg neovlašćenog pristupa blokiranjem IP adresa. Na taj način napadač se usporava u svojoj aktivnosti, što može dovesti do potencijalnog odustajanja od napada, kao i blagovremenog upozorenja administrativnog osoblja na pokušaje neovlašćenog pristupa kako bi se mogle preduzeti adekvatne zaštitne radnje [1] [3]. Efikasnost *Fail2Ban*-a zavisi od načina na koji je konfigurisan u konkretnom slučaju, kao i od smernica koje mrežni administratori postavljaju u slučaju pojedinačnih sistema.

Predmet ovog rada je analiza uzoraka iz *log* datoteka, sa ciljem da se evidencija neuspelih pokušaja prijavljivanja, prepoznatih kao sajber-napadi, pretvori u validnu vremensku seriju, koja se nadalje koristi za prognoziranje intenziteta *brute-force* napada. Na osnovu dobijene prognoze, vrši se izbor adekvatne balansirane polise zaštite, sa ciljem da se pruži adekvatna zaštita posmatranog serverskog sistema za budući period.

Rad je strukturiran u pet poglavlja. Nakon uvodnog dela, objašnjena je priroda *brute-force* napada i *Fail2ban* servisa kao vida odbrane. Potom je analizirana efikasnost pojedinih strategija polisa zaštite. U trećem poglavlju opisana je *Holt-Winters* metoda za prognoziranje kao veoma pogodna za primenu kod nestabilnih vremenskih serija. Eksperimentalni rezultati prognoziranog intenziteta *brute-force* napada dati su u četvrtom poglavlju. Na kraju su predstavljena zaključna razmatranja.

2. Brute-force napadi i Fail2ban servis kao vid odbrane

Brute-force napadi su vrsta sajber napada u kojima napadač pokušava da dobije neovlašćeni pristup sistemu, koji se realizuje sistematskim isprobavanjem svake moguće kombinacije korisničkih imena i lozinki dok se ne otkriju ispravni akreditivi. Ovi napadi su uzastopni, metodični i obično su automatizovani. Oni ostaju značajna pretnja bezbednosti na mreži i pojavljuju se u nekoliko oblika, uključujući:

- napade „upotrebom rečnika“, u kojima napadač koristi listu najčešće korišćenih lozinki ili reči iz lingvističkog rečnika da bi sistematski testirao svaku od njih. Ovaj pristup može biti veoma efikasan ako je ciljana lozinka slaba ili se često koristi;
- napade „postojećim akreditivima“, u kojima napadači koriste prethodno ukradena korisnička imena i lozinke za pristup višestrukim nalogima na različitim internet lokacijama, oslanjajući se na činjenicu da mnogi pojedinci koriste iste akreditive u različitim servisima;
- napadi hibridno generisanim akreditivima, u kojima se primenjuju kombinacije tehnika, poput upotrebe „rečnika“ u kombinaciji sa dodavanjem brojeva ili specijalnih znakova, povećavajući verovatnoću uspeha.

Pretnja od *brute-force* napada ostala je konstantna u domenu sajber bezbednosti. Dok osnovni koncept sistematskog isprobavanja svih mogućih kombinacija korisničkih imena i lozinki ostaje nepromenjen, metode i alati koje koriste napadači značajno su evoluirali. Danas, savremeni napadači koriste napredni softver i hardver, u kombinaciji sa upotrebom *botneta* (distribuiranih mreža kompromitovanih računara), čime distribuiraju

opterećenje napada i održavaju anonimnost. *Brute-force* napadi ciljaju širok spektar sistema i korisničkih servisa, uključujući individualne korisničke naloge servisa poput elektronske pošte, socijalnih mreža ili bankovnih računa. Pored navedenog, ova vrsta napada može biti usmerena i na određene vrste mrežnih pristupa, koji zahtevaju upotrebu različitih protokola, poput SSH [4], FTP ili RDP. Cilj napada je dobijanje neovlašćenog pristupa serverima i računarima, kao i sistemima za upravljanje sadržajem (CMS) u slučaju različitih oblika web servisa, kao što su blog platforme ili platforme za e-trgovinu [5] [6]. Treba napomenuti da su ove vrste web lokacija posebno interesantne napadačima, jer one često skladište informacije o drugim klijentima (korisnička imena, email adresa i *hash* vrednosti njihovih lozinki) [7]. Ranjivosti koje olakšavaju *brute-force* napade uključuju slabe lozinke, nedostatak polisa za zaključavanje naloga, kao i nešifrovane procese autentifikacije u slučaju zastarelih servisa koji još uvek nisu ugašeni na Internetu.

2.1. *Fail2ban* servis

Fail2Ban je veoma popularan softver otvorenog koda za prevenciju napada, dizajniran da zaštiti sisteme i servise praćenjem aktivnosti zapisanih u *log* datotekama, kroz pretragu obrazaca koji ukazuju na ponovljene neuspele pokušaje prijave. Funkcionisanje ovog softverskog rešenja za zaštitu može se podeliti na nekoliko ključnih koraka:

- nadgledanje aktivnosti – *Fail2Ban* kontinuirano prati *log* datoteke za unapred određeni set servisa, kod kojih vrši pretragu sadržaja u potrazi za definisanim obrascima aktivnosti koji ukazuju na višestruke neuspele pokušaje prijave na posmatrani sistem;
- uparivanje šablona – kada *Fail2Ban* otkrije unapred definisani obrazac, beleži IP adresu odgovornu za neuspele pokušaje prijave;
- primena zabrane – kada se identifikuje unapred definisani broj neuspešnih pokušaja po identifikovanom obrascu (a koji potiču sa iste IP adrese), tada se formira zabrana pristupa za posmatranu adresu, automatskim dodavanjem pravila u korespondentnom *firewall* modulu [8]. U slučaju operativnih sistema klase *Linux*, aktivira se pravilo na *firewall* modulu tipa „*iptables*“ kako bi se blokirao pristup serveru ili mreži sa identifikovane IP adrese. Ova zabrana važi u toku unapred definisanog vremenskog perioda koje je u uskoj vezi sa unapred definisanim setovima pravila zaštite, poznatijim pod nazivom „bezbednosne polise“.

Fail2Ban program ima širok spektar opcija za prilagođavanje bezbednosnih polisa specifičnim bezbednosnim potrebama. Ove opcije su podeljene u sledeće funkcionalne celine:

- filteri – pravila koja određuju koje linije u *log* datotekama treba uzeti u obzir da bi se mogao detektovati pokušaj neovlašćenog pristupa. Ove opcije se prilagođavaju u skladu sa specifičnim karakteristikama zapisa koje formira određeni operativni sistem, kao nosilac posmatranog servisa;
- pragovi – predstavljaju donju granicu vezanu za broj neuspešnih pokušaja pristupa, iznad koje se taj pristup može okarakterisati kao neovlašćen ili maliciozan;
- akcije - odgovori koje *Fail2Ban* program treba da aktivira u slučaju aktivacije definisanog filtera. Akcije mogu uključivati zabranu IP adrese, slanje obaveštenja e-poštom ili izvršavanje prilagođenih skripti, kao specifičan vid odgovora na identifikovanu pretnju;

- trajanje zabrane - trajanje IP zabrana je opcija koja se može podesiti na način, takav da posmatrana akcija predstavlja odgovor koji je adekvatan u odnosu na ozbiljnost napada, kao i definisane sistemske smernice mrežnog servisa koji je predmet odbrane;
- „zatvori“ („jails“) predstavljaju kombinaciju filtera i jedne ili više akcija, na osnovu definisanog praga, čiji je cilj da se u potpunosti definiše postupanje sa IP adresom, kao identifikovanim izvorom napada u unapred definisanom periodu trajanja zabrane.

Iz navedenog se može primetiti da *Fail2Ban* može predstavljati adekvatan odgovor na pojavu *brute force* napada na posmatranom sistemu. Ovaj program funkcioniše kao samostalni serverski servis, kojim se može upravljati ručno, u poluautomatskom i/ili automatskom režimu rada.

2.2 Efikasnost *Fail2Ban* servisa i uloga bezbednosnih polisa

Efikasnost *Fail2Ban* programa u najvećoj meri zavisi od načina na koji je definisana bezbednosna polisa za posmatrani mrežni servis. U navedenom kontekstu, bezbednosne polise se mogu definisati u opsegu od tzv. „rigidnih“, pa sve do tzv. „relaksiranih“ polisa.

„Rigidna“ *Fail2Ban* polisa predstavlja set bezbednosnih smernica koje karakterišu strogo definisani pragovi, dugo trajanje zabrane i brza reakcija čak i na mali broj neuspešnih pokušaja prijave. Ova vrsta polise može biti efikasna u brzom reagovanju na *brute-force* napade, gde čak i nekoliko neuspešnih pokušaja prijave može da izazove blokadu određene IP adrese (tzv. IP ban), sprečavajući napadače da učine dalje pokušaje sa tog adresnog izvora. Na taj način se minimizira tzv. „prozor mogućnosti“ za napadače. Međutim, preterano rigidne smernice mogu nenamerno da iscrpe sistemske resurse tako što će zabraniti previše IP adresa u određenom vremenskom periodu. Na taj način, odziv sistema se smanjuje na način sličan kao u slučaju *Denial of Service* (DoS) napada. Pored navedenog, rigidne smernice mogu da ometaju i korisnike, koji pogrešno ukucaju lozinke ili naiđu na privremene probleme sa autentifikacijom. To ima za rezultat povećane operativne troškove (tzv. „administratorsko opterećenje“), imajući u vidu potrebu za stalnim nadgledanjem kao i učestalim administrativnim poslovima deblokade legitimnih korisnika u slučaju servisa sa masovnom upotrebom.

Sa druge strane, tzv. „relaksirana“ *Fail2Ban* polisa uključuje blaže pragove reakcije, kraće trajanje zabrane i „više prijateljski“ odnos prema neuspešnim pokušajima prijave. Prednost primene relaksirane bezbednosne polise se ogleda u tome da se one karakterišu kao „prilagođene korisničkim potrebama“, imajući u vidu da umanjuju verovatnoću smetnje korisnicima sa stvarnim problemima sa prijavljivanjem. Na taj način je smanjeno „administrativno opterećenje“ odnosno umanjene potrebe za intervencijama, čime se smanjuju i operativni troškovi u slučaju masovnih servisa. Pored navedenog, manja je i verovatnoća da će relaksirana polisa dovesti do iscrpljivanja serverskih resursa zabranom manjeg broja IP adresa. Ipak, „relaksirana“ polisa pruža napadačima veći „prozor mogućnosti“, pružajući im mogućnost da održe kontinuitet *brute force* napada, kroz frekventniju ponovnu upotrebu istog IP adresnog opsega koji im stoji na raspolaganju, uvećavajući na taj način verovatnoću uspešne realizacije neovlašćenog pristupa.

Balansirana konfiguracija *Fail2Ban* smernica, odnosno balansirana bezbednosna polisa ima za cilj da uspostavi ravnotežu između bezbednosti i upotrebljivosti. Ovakva konfiguracija zavisi od specifičnih zahteva sistema, razvoja pretnji i tolerancije na lažne

pozitivne rezultate. U praksi, mnogi sistemi se opredeljuju za primenu umerenih polisa koje nisu ni preterano rigidne, niti previše relaksirane. Ovakve polise se dobijaju uzimanjem u obzir potreba korisnika, potencijalni uticaj na sistemske resurse i potreban nivo zaštite. Pored toga, redovno praćenje i prilagođavanje polisa imaju ključnu važnost u procesu održavanja ravnoteže između navedenih potreba. Promenom različitih pripadajućih parametara, dobija se čitav niz različitih polisa, koje predstavljaju gradaciju između balansiranih i rigidnih polisa.

Shodno navedenom, operativni pristup koji ima za cilj postizanje ravnoteže između bezbednosti i upotrebljivosti prilikom konfigurisanja *Fail2Ban* smernica zahteva pažljivo posmatranje rada datog servisa, kao i kontinuiranu primenu adekvatnih mera, zasnovanu na kontinuiranoj proceni efikasnosti uvedenih polisa. Ove mere se odnose na podešavanje pragova i trajanja odgovarajućih zabrana, kao i na druga podešavanja koja treba primeniti po potrebi. Ovi koraci se zasnivaju na analizi tipičnih obrazaca prijavljivanja i ponašanja korisnika, sa ciljem uočavanja eventualno novih metoda koje se javljaju u pokušajima neovlašćenog pristupa, kao i zbog potreba minimizacije lažnih pozitivnih rezultata sa druge strane. Na osnovu toga vrši se fino podešavanje parametara „jails“ sekcije *Fail2Ban* programa. Naknadna provera upotrebljivosti rekonfigurisanih sistema vrši se u komunikaciji sa krajnjim korisnicima, prikupljanjem povratnih podataka.

Dodatni procesi automatizacije servisa mogu se postići kroz kontinuirano praćenje log datoteka, primenom automatskih alata za analizu, zatim implementacijom sistema upozorenja, kojim se obaveštavaju administratori o neuobičajenim visokim nivoima neuspešnog prijavljivanja, kao i naknadnim analizama uzroka ovakvih pojava.

Pored navedenog treba uvek imati u vidu da primena bezbednosnih programa poput *Fail2Ban* nije dovoljna za potpunu zaštitu od *brute force* napada, koja se značajno može uvećati i primenom sistema za multi-faktorsku autentifikaciju (*Multi-factor authentication*, MFA), sistema za detekciju intruzija (*Intrusion Detection System*, IDS), sistema za naprednu detekciju anomalija, poput sistema za multivarijantno statističko praćenje mreže (*Multivariate Statistical Network Monitoring*, MSNM) [9] kao i primenom metoda prevencije, koja se ogleda u podsticanju korisnika u sprovođenju redovne zamene lozinki, kao i redovnim informisanjem korisnika o najboljim praksama u sajber bezbednosti.

3. Primena *Holt-Winters* metode za prognoziranje *brute-force* napada

Holt-Winters (HW) metoda spada u kratkoročne metode prognoziranja nestabilnih vremenskih serija ulaznih podataka. Primenjuje se kada postoji izražen trend, kao i sezonska komponenta [10] [11]. Pripada grupi *ad hoc* procedura prognoziranja. Predstavlja preteču modernih strukturnih modela za koje je utvrđeno da se baziraju na statističkoj teoriji a mogu se smatrati posebnim slučajevima opšte klase modela strukturnih vremenskih serija koji su nastali proširenjem Eksponencijalnog izgladivanja (*Exponential Smoothing*) i ARIMA (*Auto Regressive Integrated Moving Average*) modela [12] [13]. Postoje dva osnovna oblika primene *Holt-Winters* metode: Aditivna *Holt-Winters* metoda i Multiplikativna *Holt-Winters* metoda.

Multiplikativna *Holt-Winters* metoda se bazira na tri jednačine izgladivanja. Prvom jednačinom se izgladuje nivo posmatrane veličine, drugom trend, a trećom sezonske varijacije.

Nivo vremenske serije podataka, l_t , može se definisati sledećom jednačinom:

$$l_t = \alpha \left(\frac{y_t}{S_{t-s}} \right) + (1 - \alpha)(l_{t-1} + b_{t-1}) \quad (1)$$

Stepen rasta ili trend, b_t , definiše se jednačinom:

$$b_t = \gamma(l_t - l_{t-1}) + (1 - \gamma)b_{t-1} \quad (2)$$

Nakon određivanja nivoa i trenda, određuje se sezonski faktor, S_t :

$$S_t = \beta \left(\frac{y_t}{l_t} \right) + (1 - \beta)S_{t-s} \quad (3)$$

gde su: α, β i $\gamma \in [0,1]$ konstante izgladivanja; s je broj sezona u godini (npr. za mesečne podatke $s=12$, za kvartalne podatke $s=4$); y_t je ulazni podatak vremenske serije za vreme t .

Ova metoda je veoma pogodna kada vremenska serija ima linearan trend sa multiplikativnim sezonskim uticajem kod koje se nivo serije, indeks rasta i sezonski uticaj mogu sporo menjati tokom vremena.

Izračunavanje prognoziranih vrednosti u trenutku t , dato je sledećim izrazom:

$$\hat{y}_{t+m}(t) = (l_t + b_t m) S_{t+m-s}, \text{ za } m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

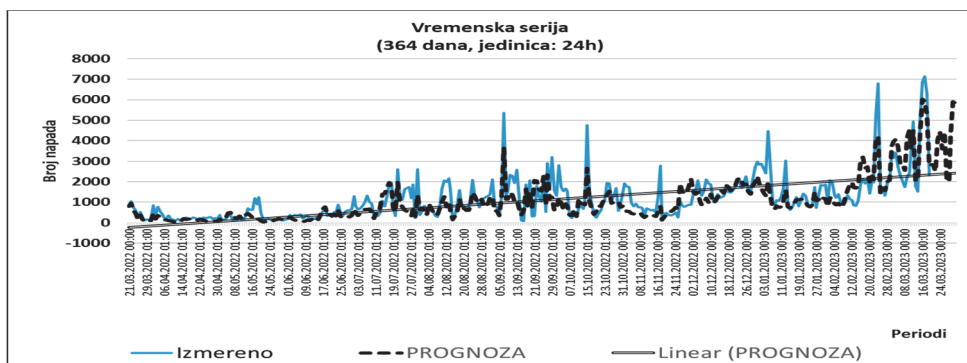
Izbor konstanti α, β i γ u *Holt-Winters*-ovom modelu zahteva posebnu pažnju. Optimizacija konstanti izgladivanja treba da da najmanju sumu kvadrata grešaka (SSE):

$$SSE = \sum_{t=1}^T [y_t - \hat{y}_t(t-1)]^2 \quad (5)$$

Ovo je moguće izvršiti uz korišćenje *Excel Solver* alata.

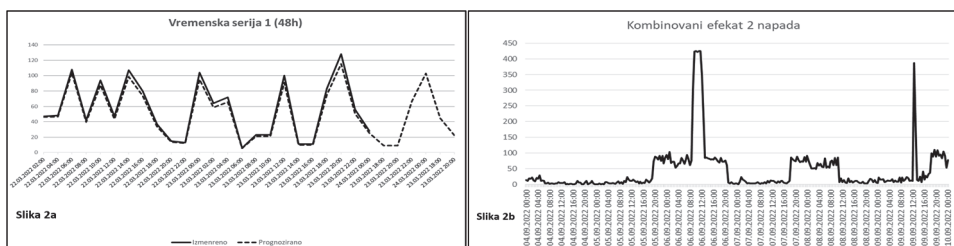
4. Eksperimentalni rezultati

Za potrebe analize učestanosti *brute-force* napada, izvršena je ekstrakcija vremenske serije iz *Fail2ban log* datoteke registrovanih napada u realnom okruženju mreže Saobraćajnog fakulteta (SF NET) za period od godinu dana (21.03.2022.–21. 03.2023. godine, slika 1). U ovoj datoteci evidentirani su neispravni unosi korisničkih akreditiva, pri čemu se pod napadom podrazumeva višestruki pokušaj unosa, koji je rezultovao blokadom izvorišne IP adrese. Drugim rečima, broj napada istovremeno predstavlja i broj blokiranih IP adresa. Log podaci su strukturirani metodom formiranja klastera događaja prema pripadnosti korespondentnim vremenskim intervalima u trajanju od 5, 30, 120 i 1440 minuta (24 časa), čime su dobijene vremenske serije na dnevnom, nedeljnom, mesečnom i godišnjem nivou. Vremenska serija na godišnjem nivou (slika 1) ima blago rastući trend i delimično prisutan sezonski uticaj. Sezonska varijacija takođe blago raste sa porastom trenda i to u slučaju kratkotrajnih i intenzivnih napada u ravnomernim vremenskim intervalima (07.09.2022, 15.10.2022., 17.11.2022, 05.01.2023. i 24.02.2023. godine).



Slika1. Vremenska serija dobijena iz log fajlova Fail2ban za jednogodišnji period

Vremenska serija na nedeljnom nivou, u kojoj su događaji grupisani u klustere u odnosu na osnovni period aktivnosti od 2 časa, daje drugačiji uvid u prirodu *brute-force* napada. Naime, u uzorcima ove vremenske serije, u zavisnosti od datuma, uočene su dve tipične pojave – česte sezonske varijacije, koje rastu sa porastom trenda, koje su uočljive na vremenskim intervalima od 48 časova (slika2a). Pored navedenih, mogu se uočiti i periodični napadi nižeg intenziteta sa dužim trajanjem, kao i periodični napadi srednjeg intenziteta koji mogu biti kombinovani sa kratkotrajnim napadima visokog intenziteta (slika 2b).



Slika2. Vremenska serija sa periodom 2h: sezonska komponenta (a) i kombinovani napad (b)

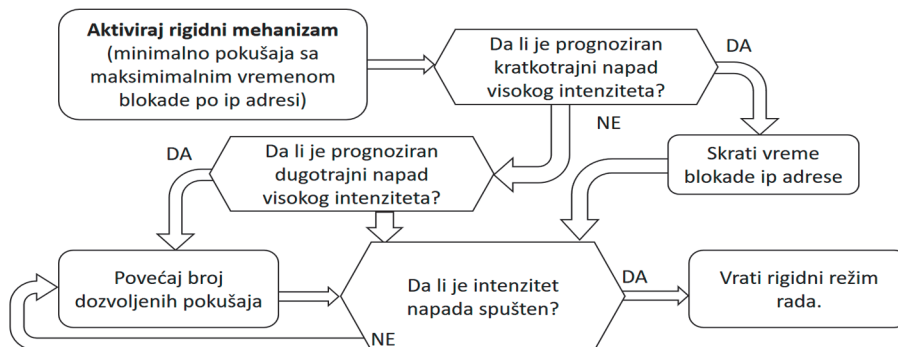
Izrazita sezonska komponenta može se takođe uočiti na pojedinim segmentima vremenske serije sa osnovnim periodom od 30 minuta. Međutim, ova pojava nije redovna i pritom je često kombinovana sa napadima slučajnog karaktera, zbog čega nije uzeta u obzir u daljoj analizi. Imajući u vidu navedenu analizu dobijenih vremenskih serija izvršeno je prognoziranje intenziteta *brute-force* napada. U ovom eksperimentu, primenjena je *Holt-Winters* multiplikativna metoda, imajući u vidu karakteristike sezonskih varijacija u slučaju vremenskih serija prikazanih na slikama 1 i 2a. Prognozirane vrednosti prikazane su na slikama isprekidanim linijama. Na početku eksperimenta, izabrane su podjednake vrednosti 0,5 za sva tri koeficijenta izgladivanja (α , β i γ). Prognoziranje je izvršeno uz pomoć posebno napravljenog šablona u programskom paketu MS Excel. Rezultati prognoziranja nadalje su podvrgnuti proverbi upotrebom standardnih testova *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Square Error* (MSE) i *Mean Absolute*

Percentage Error (MAPE), uz upotrebu alata *Solver*, kojim je izvršena pretraga za onim vrednostima koeficijenata izgladivanja, koji daju njihove minimalne vrednosti (Tabela 1).

Tabela 1. Vrednosti koeficijenata izgladivanja i rezultati testova pouzdanosti prognoziranja

Vrem. serija	α	β	γ	MSE	MAE	MAPE (%)
1	0.07318	0.017727	0.60527	395.998	342684.748	40.521
2a	4.54E-08	2.2E-307	1	4.31119	29.17463	7.81982

Dobijeni rezultati prognoziranja iniciraju na zamenu *Fai2ban* polisa. Shodno navedenom, predlaže se da se zamena realizuje automatizovanim procesom baziranim na upotrebi *bash* skripta operativnog sistema, u skladu sa tokom događaja koji je prikazan na slici 3.



Slika3. Tok događaja iniciran prognoziranim vrednostima

Zamena polise uvek počinje i završava se aktiviranjem rigidne politike, koja pruža najveći stepen zaštite. Ovaj koncept je zasnovan na pretpostavci da primena rigidne politike pruža puni vid zaštite i da se određenom vremenskom periodu može dozvoliti delimična relaksacija, da bi sistem bio zadržan u funkcionalnom stanju za krajnje korisnike. Shodno navedenom, u zavisnosti od prognoziranog tipa napada skript će aktivirati one polise koje imaju više gradacija, bilo da se radi o promeni vrednosti “praga”, “vremena zaštite” ili vrednosti “*jail*” parametara.

5. Zaključak

Brute-force napadi ostaju i dalje stalna pretnja koja se razvija u domenu sajber bezbednosti. *Fail2Ban*, sa svojom sposobnošću da blokira IP adrese nakon uzastopnih neuspešnih pokušaja prijave, nudi efikasnu protivmeru. Po identifikaciji napada, ovaj program preduzima mere da spreči dalji neovlašćeni pristup, obično aktiviranjem *firewall* modula radi privremenog ili trajnog blokiranja IP adrese, koja je povezana sa zlonamernim pokušajem prijavljivanja na posmatrani sistem. Konfiguracija *Fail2Ban* programa ima vitalnu ulogu u ostvarivanju visokog stepena zaštite uz minimiziranje operativnih troškova administracije. Izbor između rigidnih i relaksiranih *Fail2Ban* politika uključuje kompromise, u obliku čitavog niza različitih polisa koje predstavljaju balans između krajnjih rešenja, koji zavisi od jedinstvenih okolnosti organizacije, okruženja pretnji i

ponašanja korisnika. Različiti scenariji napada koji se mogu desiti zahtevaju primenu koncepta automatizacije procesa zaštite, u kojima se vrši aktivacija one polise, koja bi predstavljala adekvatan odgovor na identifikovani napad. U ovom radu, predložen je pristup automatizaciji procesa zaštite od *brute-force* napada, koji se bazira na primeni odgovarajuće polise zaštite u odnosu na prognozirani intenzitet napada. Pristup baziran na prognoziranju intenziteta napada, motivisan je činjenicom da preventivni oblik zaštite predstavlja najbolji vid odgovora na pretnje. Shodno navedenom izvršen je eksperiment u kome je ispitana mogućnost upotrebe *Holt-Winters* multiplikativne metode, imajući u vidu da je moguće identifikovati karakteristike sezonskih varijacija u slučaju pojedinih vremenskih serija, koje su dobijene kroz proces struktuiranja događaja, zabeleženih u log datotekama.

Fail2Ban ne može biti jedino rešenje koje se primenjuje i u tom kontekstu neće biti efikasan protiv visoko sofisticiranih napadača koji koriste distribuirane *botnete* ili mreže koje imaju pristup velikom broju IP adresa. U takvim slučajevima, kombinacija bezbednosnih mera je neophodna za sveobuhvatnu zaštitu. Zbog toga u budućnosti, borba protiv *brute-force* napada nastaviće da se razvija, kao odgovor na nove pretnje koje zahtevaju inovativna rešenja. Shodno navedenom, postoji stalna potreba da se *Fail2Ban* i slični alati prilagode za rešavanje ovih izazova.

Literatura

- [1] K. Hynek, T. Beneš, T. Čejka / H. Kubátová, „Refined detection of SSH brute-force attackers using machine learning,“ u *ICT Systems Security and Privacy Protection: 35th IFIP TC 11 International Conference, SEC 2020, Maribor, Slovenia, September 21–23, 2020, Proceedings* 35, 2020.
- [2] C. Jaquier, „Fail2Ban GitHub repository,“ [Na mreži]. Available: <https://github.com/fail2ban/fail2ban>.
- [3] Crooks, David and Vâlsan, Liviu and Mohammad, Kashif and McKee, Shawn and Clark, Paul and Boutcher, Adam and Padée, Adam and Wójcik, Michal and Giemza, Henryk and Kreukniet, Bas, „Operational security, threat intelligence & distributed computing: the WLCG Security Operations Center Working Group,“ *EPJ Web Conf.*, t. 214, p. 03029, 2019.
- [4] J. Park, J. Kim, B. B. Gupta / N. Park, „Network log-based SSH brute-force attack detection model,“ *Computers, Materials & Continua*, t. 68, 2021.
- [5] M. Hölbl, K. Rannenbergh / T. Welzer, *ICT Systems Security and Privacy Protection*, Springer, 2020.
- [6] M. Idhom, H. E. Wahanani / A. Fauzi, „Network Security System on Multiple Servers Against Brute Force Attacks,“ *2020 6th Information Technology International Seminar (ITIS)*, pp. 258-262, 2020.
- [7] S. Latha / S. J. Prakash, „A survey on network attacks and Intrusion detection systems,“ u *2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2017.
- [8] J. Luxemburk, K. Hynek / T. Čejka, „Detection of https brute-force attacks with packet-level feature set,“ u *2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2021.

- [9] S. Soufiane, R. Magan-Carrion, I. Medina-Bulo / H. Bouden, „Preserving authentication and availability security services through multivariate statistical network monitoring,“ *Journal of Information Security and Applications*, t. 58, p. 102785, 2021.
- [10] C. P. Da Veiga, C. R. P. Da Veiga, A. Catapan, U. Tortato / W. V. Da Silva, „Demand forecasting in food retail: A comparison between the Holt-Winters and ARIMA models,“ *WSEAS transactions on business and economics*, t. 11, p. 608–614, 2014.
- [11] S. Rubab, M. F. Hassan, A. K. Mahmood / S. N. M. Shah, „Forecasting volunteer grid workload using Holt-Winters' method,“ u *2015 International Symposium on Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET)*, 2015.
- [12] M. J. Gundalia / M. B. Dholakia, „Prediction of maximum/minimum temperatures using Holt Winters method with Excel spreadsheet for Junagadh region,“ *International journal of engineering research & technology*, t. 1, p. 1–8, 2012.
- [13] V. Lepojević / P. M. Anđelković, „Forecasting electricity consumption by using holt-winters and seasonal regression models,“ *Facta universitatis-series: Economics and Organization*, t. 8, p. 421–431, 2011.

Abstract:

Brute-force attack is a hacking method that poses a threat to a wide range of online systems and accounts, including computers, networks, servers and online services. Fail2Ban service as an adequate response to this type of attacks can achieve different protection efficiency depending on the applied protection policy. The strict protection policy in Fail2Ban service has numerous implications, including increased load of server resources and reduced service availability to end users. Conversely, an overly relaxed protection policy is "user friendly" and reduces server load, but results in increased likelihood of user credentials and passwords being hacked. As a compromise solution, the choice of protection policy that belongs to the class of so-called balanced policies is imposed. In this paper, the emphasis is given to the selection of a balanced protection policy level based on the forecasted brute-force attack intensity that is performed by the Holt-Winters method. The results are obtained by monitoring the real server system operation in the authors' institution local network.

Keywords: *brute-force attacks, Fail2Ban service, protection policy, forecasting, Holt-Winters method.*

**FORECASTING OF THE BRUTE-FORCE ATTACKS INTENSITY IN
FUNCTION OF THE PROTECTION LEVEL OPTIMIZATION**

Slobodan Mitrović, Valentina Radojičić, Goran Marković

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.013>

OBJEKTIVNA PROCENA KVALITETA H.264, H.265 I H.266 KOMPRIMOVANIH VIDEO SEKVENCI

Boban Pavlović, Omar Zelmati

Univerzitet odbrane u Beogradu – Vojna akademija
bobanpav@yahoo.com, zelmatiomar1991@gmail.com

Rezime: *U radu je analiziran kvalitet H.264, H.265 i H.266 komprimovanih video sekvenci iz vidljivog (engl. VISible, VIS), bliskog infracrvenog (engl. Near InfraRed, NIR) i dalekog infracrvenog (engl. Long Wavelength InfraRed, LWIR) spektralnog opsega. Za potrebe poređenja standarda kompresije formirana je baza komprimovanih videa. Iz javno dostupne baze TRICLOBS izabrano je osam sekvenci koje pokrivaju širok spektar sadržaja, odnosno scenarija sa fiksnom scenom i pokretnom kamerom. Za svaki standard usvojeno je pet različitih faktora kvaliteta, tako da se za originalni video iz svakog kanala (VIS, NIR i LWIR) dobija po 15 komprimovanih video zapisa, čime je formirana baza od 360 komprimovanih sekvenci. Za objektivnu procenu kvaliteta videa korišćen je vršni odnos signal/šum (engl. Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR). Analizirana je zavisnost PSNR od faktora kvaliteta prema tri korišćena standarda za sva tri spektralna opsega. U završnom delu rada data je uporedna analiza veličina komprimovanih fajlova po opsezima i primenjenim standardima.*

Ključne reči: *H.264, H.265 i H.266 kompresija, faktor kvaliteta (QF), objektivna procena kvaliteta, vršni odnos signal/šum (PSNR)*

1. Uvod

Sa porastom Internet video striminga, kao i sa povećanjem rezolucija koje koriste kamere i njihovom upotrebom od strane civilnog društva i bezbednosnih službi, zahtevaju se veliki memorijski prostor i propusni opseg. Iz tog razloga primena visoko efikasnih tehnika video kompresije je od ogromne važnosti. Trenutno je analiza njihovih performansi jedna od vodećih tema istraživanja [1, 2].

Pošto je brzina kadrova video snimka često relativno visoka (najčešće 30 kadrova u sekundi), a parametri kamere (žižna daljina, pozicija, ugao gledanja, itd.) obično se ne menjaju brzo između kadrova, sadržaj uzastopnih kadrova je obično sličan, osim ako se određeni objekti u sceni ne kreću izuzetno brzo ili se scena promeni [3]. Drugim rečima, video ima i vremensku redundansu, za razliku od tehnika kompresije slike koje koriste prostornu redundansu, s obzirom da se sadržaj slike menja relativno sporo, čineći potiskivanje komponenti viših prostornih frekvencija održivim.

Vremenska redundansa je značajna i obezbeđuje, umesto kodovanja svakog pojedinačnog kadra, kodovanje razlike između trenutnog kadra i drugih kadrova u nizu. Ako je redundansa između njih dovoljno velika, slike razlike se uglavnom sastoje od malih vrednosti i imaju niske entropije, što je izuzetno dobro za kompresiju. Savremeni algoritmi video kompresije (H.264, H.265 i H.266) usvajaju hibridni pristup kodovanja, tj. predviđaju i kompenzuju razlike između video kadrova kako bi se uklonila vremenska redundansa, a zatim prešlo na kodovanje rezidualnih grešaka (razlika) [4]. Iako je oduzimanje jedne slike od druge jednostavno (piksel po piksel), takav pristup je neefikasan u postizanju visokog stepena kompresije. Pošto je glavni uzrok razlike između kadrova kretanje kamere i/ili objekta, ovi generatori pokreta mogu se „kompenzovati” detektovanjem pomeranja odgovarajućih piksela ili regiona u ovim kadrovima i određivanjem njihovih razlika. Za algoritme video kompresije koji usvajaju ovaj pristup se kaže da su zasnovani na kompenzaciji kretanja MC (engl. *Motion Compensation*).

U ovom radu su prikazani osnovni koncepti video kodovanja za tri popularna standarda zasnovana na kompenzaciji kretanja (H.264/AVC/, H.265/HEVC/ i H.266/VVC/). Kreirana je nova baza komprimovanih videa za potrebe testiranja i analize uticaja svakog standarda kompresije na kvalitet video sekvenci iz vidljivog, NIR i LWIR spektralnih opsega. Dvadeset četiri video sekvence su komprimovane korišćenjem svakog od standarda kompresije postavljanjem adekvatnog faktora kvaliteta. Na kraju je dobijeno ukupno 360 komprimovanih video sekvenci.

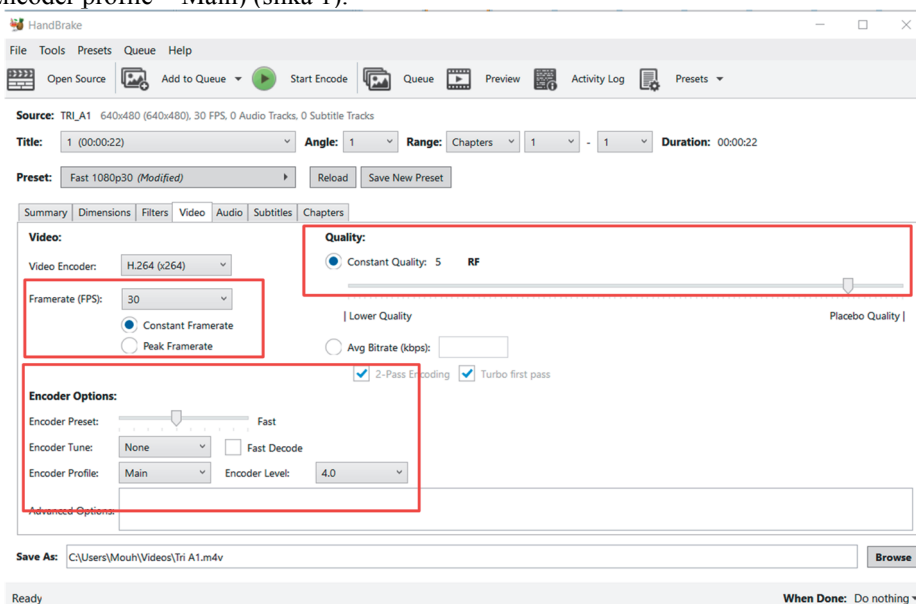
Za procenu kvaliteta slike i videa, kao objektivna mera je korišćen vršni odnos signal/šum PSNR (engl. *Peak Signal-to-Noise Ratio*), zbog svoje jednostavnosti. Analizirana je zavisnost PSNR od faktora kvaliteta prema tri korišćena standarda za sva tri spektralna opsega. U završnom delu rada data je uporedna analiza veličina komprimovanih fajlova po opsezima i primenjenim standardima.

2. Standardi video kompresije

Standarde video kodovanja H.264, H.265 i H.266 zajednički su razvili ISO/IEC MPEG (engl. *Moving Pictures Experts Group*) i ITU-T VCEG (engl. *Video Coding Experts Group*). Glavni cilj H.264/AVC (engl. *Advanced Video Coding*) i H.265/HEVC (engl. *High Efficiency Video Coding*) [5] bio je da poboljšaju efikasnost kodovanja kako bi odgovorili zahtevima za sve većom količinom video podataka zbog povećanja rezolucije videa i brzine kadrova, imajući u vidu uvođenje snimaka visoke definicije i kasnije video/TV ultra visoke definicije (engl. *Ultra-High Definition, UHD*). U poslednje vreme, H.266 (engl. *Versatile Video Coding, VVC*) je razvijen da dalje rešava gore navedena pitanja, kao i zbog novih aplikacija video zapisa, kao što su video velikog dinamičkog opsega (engl. *High Dynamic Range, HDR*), videa od 360°, panoramski video i druge [6].

Da bi se izvršila kompresija primenom H.264 i H.265 koda, korišćen je softverski alat HandBrake (slika 1). Za standard H.266, primenjen je javno dostupni encoder Fraunhofer VVenC (engl. *Versatile Video Encoder*) [7]. Kodovanje se vrši tako da se svaki originalni video komprimuje prema pet različitih faktora kvaliteta (QF). Za H.264 i za H.265, usvojeno je pet vrednosti QF (5, 15, 25, 35, 50), čime se dobija pet novih komprimovanih video snimaka. Faktor kvaliteta QF=5 odgovara najvišem kvalitetu, a QF=50 odgovara najnižem kvalitetu. Parametri H.264 i H.265 koda su sledeći: brzina kodovanja = 'brzo' (engl. *Fast*), konstantan broj slika u sekundi (30 fps), nema dodatnog

podešavanja enkodera (engl. Encoder Tune = None), profil enkodera = glavni (engl. Encoder profile = Main) (slika 1).



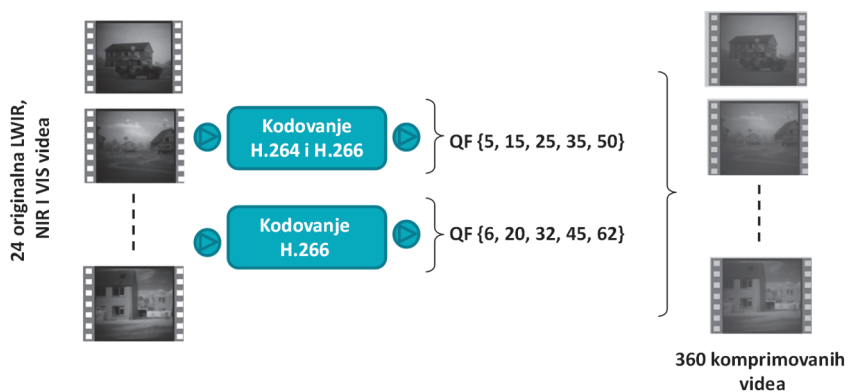
Korišćena implementacija H.266 kodera ima drugačiji opseg QF (od 0 do 63), tako da su QF vrednosti za ovaj tip kompresije izabrane korišćenjem jednostavne analogije sa opsegom implementacija H.264 i H.265 (od 0 do 51). Tako su za H.266 kodovanje korišćene vrednosti QF od 6, 20, 32, 45 i 62, pri čemu QF=6 odgovara najvišem kvalitetu, a QF=62 odgovara najnižem kvalitetu. Za sva poređenja izvršena u ovom radu vrednosti QF koje odgovaraju standardu H.266 su prikazane na slikama tako da odgovaraju opsegu vrednosti kao QF za H.264 i H.265.

Nakon konverzije originalnog videa u YUV (Y,Cb,Cr) format korišćenjem ffmpeg [8] okvira, komandna linija koja se koristi za kodovanje video zapisa u H.266 je prikazana na slici 2, gde se može uočiti da se koriste sledeći parametri: brzina kodovanja = 'brzo', rezolucija video snimka = 640×480, tempo = 30 fps, format kodovanja YUV = 4:2:0 i QF=6. Korišćeni enkoder (VVenC) podržava paralelizaciju na nivou okvira i zadataka sa veoma dobrim skaliranjem, te je ušteda u vremenu bila znatno veća.

```
D:\>vvencapp --preset fast -i "avi_baza\LWIR\original\TRI_A1.yuv" -s 640x480
-r 30 -c yuv420 -q 6 -o "avi_baza\LWIR\H266\QF1\TRI_A1.266"
```

Slika 2. Primer H.266 kodovanja pomoću VVenC komandne linije

Kodovanje je obavljeno na laptopu ASUS TUF GAMING A15 sa sledećom konfiguracijom: CPU AMD RYZEN 7 6000 SERIES, GPU NVIDIA RTX 3060 8GB i 16GB RAM memorije. Za svaki originalni video iz posmatranog kanala (VIS, NIR i LWIR) dobija se 15 komprimovanih video zapisa, po 5 od svakog standarda (H.264, H.265 i H.266). Konačno se dobija 360 komprimovanih video zapisa koji se čuvaju za dalju obradu i analizu. Slika 3 prikazuje dijagram formiranja nove baze komprimovanih videa.



Slika 3. Dijagram formiranja nove baze komprimovanih videa



(a) QF=25, H.264:
PSNR=39.36 dB

(b) QF=25, H.265:
PSNR=46.35 dB

(c) QF=31, H.266:
PSNR=45.66 dB



(d) QF=35, H.264:
PSNR=37.62 dB

(e) QF=34, H.265:
PSNR= 44.20 dB

(f) QF=43, H.266:
PSNR=42.13 dB



(g) QF=50, H.264:
PSNR=28.39 dB

(h) QF=50, H.265:
PSNR= 38.48 dB

(i) QF=62, H.266:
PSNR=34.50 dB

Slika 4. Prikaz izabranog kadra VIS kanala videa 1 kroz tri standarda i kroz tri QF-a

Slika 4 ilustruje primer izabranog kadra iz video snimka 1. Prikazane su originalna verzija i njene degradirane verzije za VIS kanal i za sva tri primenjena standarda kompresije (H.264, H.265 i H.266). Standard H.264 daje niži PSNR za sve kanale i za sve faktore kvaliteta u poređenju sa standardima H.265 i H.266. Za ovaj kadar, razlika između vrednosti PSNR dobijenih za standarde H.265 i H.266 manja je od razlike vrednosti PSNR ova dva standarda u odnosu na vrednost za H.264. Dodatno se može zapaziti da je prednost u objektivnom kvalitetu na strani H.266 kompresije za frejm najboljeg kvaliteta – QF=5/6, a sa povećanjem vrednosti QF (narušavanje kvaliteta) prednost u objektivnom kvalitetu na strani H.265 kompresije.

Razlika između degradiranih verzija i originalne verzije izabranog kadra za posmatrani VIS kanal može se uočiti tek za vrednost QF=25, dok je razlika jasno uočljiva za QF=50 (slika 4).

3. Analiza rezultata objektivnih mera procene kvaliteta

Objektivne mere procene kvaliteta videa OVQA (engl. *Objective Video Quality Assesment*) imaju tri vrste primene [9]. Prvo, mogu se koristiti za praćenje kvaliteta videa radi kontrole sistema prenosa. Drugo, mogu se koristiti za odabir sistema ili algoritama za obradu videa. I treće, mogu se ugraditi u sistem za obradu video zapisa kako bi se optimizovali algoritmi i parametri koji se koriste. Za proučavanje performansi korišćenih standarda sprovedena je objektivna analiza kvaliteta pomoću PSNR objektivne mere [10].

U cilju objektivne mere procene kvaliteta, korišćene su vrednosti vršnog odnosa signal-šum (PSNR) [11]. Ova mera predstavlja poređenje između originalnog i komprimovanog videa. PSNR vrednost u decibelima (dB) je proporcionalna kvalitetu komprimovanog video zapisa. U praksi, $PSNR_d$ komprimovanog video zapisa V_d nastalog od originalnog videa V_o , dobija se usrednjavanjem PSNR-ova

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE}, \quad (1)$$

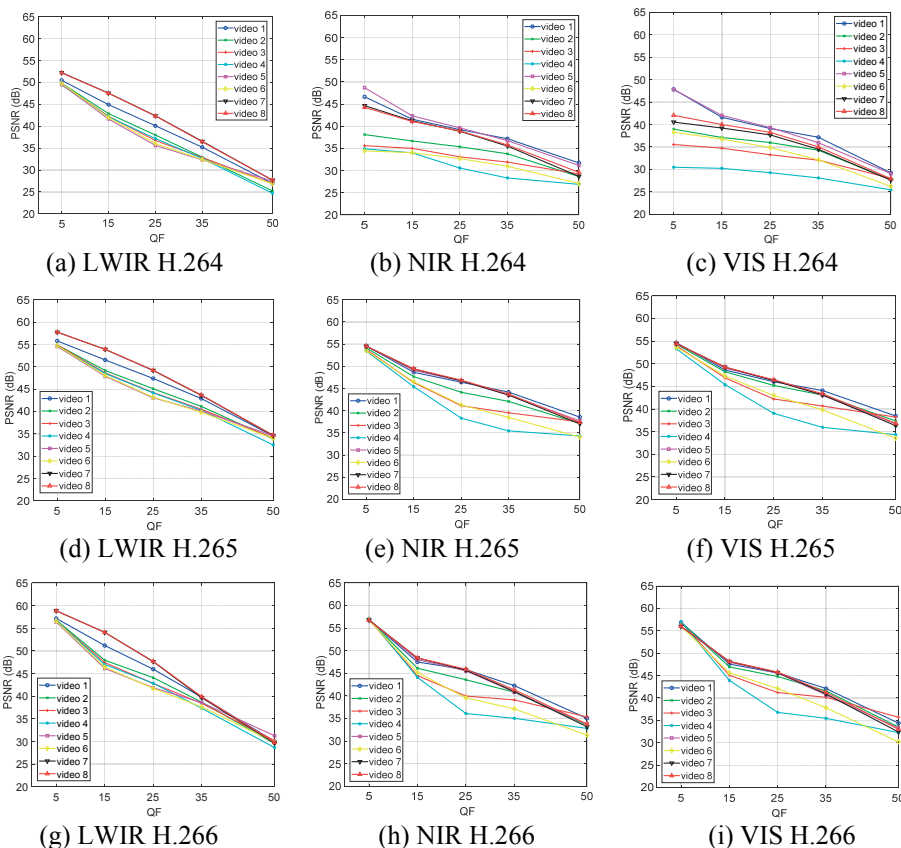
između njihovih kadrova:

$$PSNR_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PSNR(V_d(i), V_o(i)), \quad (2)$$

gde je n broj kadrova i $V_d(i)$ i $V_o(i)$ su kadrovi video zapisa V_d i V_o sa rednim brojem i .

Slika 5 prikazuje PSNR u zavisnosti od faktora kvaliteta (QF) prema tri standarda za osam video sekvenci iz LWIR, NIR i vidljivog dela spektra (VIS). Primećuje se da za LWIR kanal krive svih osam komprimovanih sekvenci za sva tri standarda imaju isti nagib (Slika 5(a), slika 5(d) i slika 5(g)), dok se za NIR i VIS kanale kod sva tri standarda primećuje veliko odstupanje u nagibu između krivih sekvenci komprimovanih korišćenjem istog standarda (slika 5(b), slika 5(c), slika 5(e), slika 5(f), slika 5(h) i slika 5(i)).

Odstupanje u nagibu je izraženije kod tri video sekvence i to su: video 3, 4 i 6, gde su najniže vrednosti PSNR za ove video snimke u funkciji QF za NIR i VIS kanale. Na primer, najniža vrednost PSNR je za video 4 (25.45 dB) kanala VIS komprimovan H.264 standardom sa QF=50 (slika 5(c)). Uzrok odstupanja ova tri videa može biti prisustvo AWGN šuma.

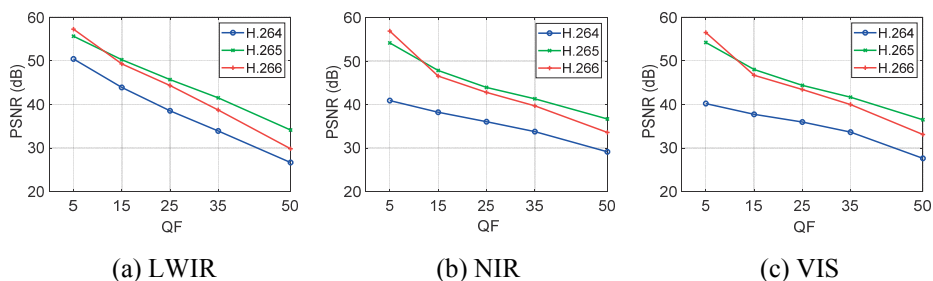


Slika 5. Prikaz PSNR-a u zavisnosti od QF-a za svih 8 komprimovanih video sekvenci za sva tri kanala i korišćenjem sva tri standarda

Slika 6 ilustruje poređenje srednjih vrednosti PSNR za osam video sekvenci po QF za sva tri standarda. Poređenje je prikazano za svaki od tri kanala zasebno.

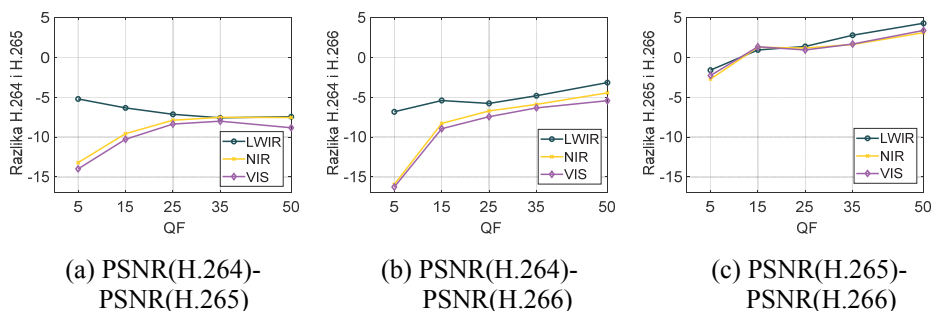
Može se primetiti da se za sva tri kanala dobijaju najniže srednje vrednosti PSNR za standard H.264 (najniži kvalitet) za sve nivoe kvaliteta. Srednje vrednosti PSNR su najveće za standard H.265 za sve kanale kroz sve QF vrednosti osim za QF=5, gde standard H.266 daje nešto veću vrednost PSNR u sva tri kanala. Na primer, sa slike 6(a) se može videti da je za LWIR kanal i za QF=5 vrednost PSNR koja odgovara standardu H.266 (PSNR=57,24 dB) veća od one dobijene za standard H.265 (PSNR=55,63 dB) za 1,61 dB.

Da bi se bolje uporedile performanse standarda za različite QF vrednosti, razlike između srednjih vrednosti PSNR za svaki par standarda za sva tri kanala su prikazane na slici 7.



Slika 6. Uporedni prikaz srednjih vrednosti PSNR za osam video sekvenci po QF za sva tri standarda i za: (a) LWIR kanal, (b) NIR kanal i (c) VIS kanal

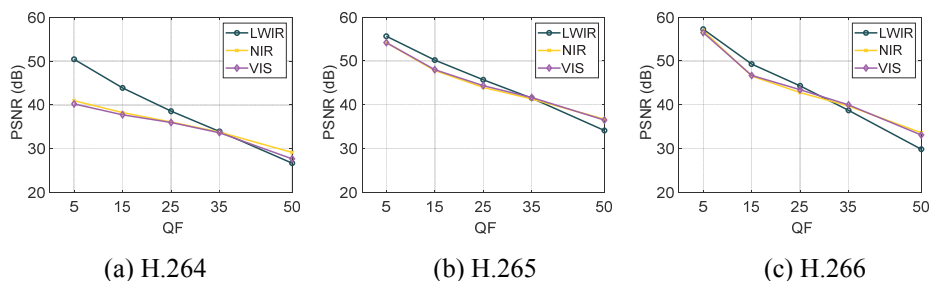
Primećuje se da se najveći dobitak u kvalitetu dobija za standard H.266 u odnosu na standard H.264 (razlika je 16,27 dB) za QF=5 i za VIS kanal (slika 7(b)). Sa iste slike se uočava da je za LWIR kanal u poređenju sa NIR i VIS kanalima, dobitak u kvalitetu između H.264 i H.266 znatno niži kroz sve nivoe kvaliteta. Razlika srednjih vrednosti PSNR između standarda H.264 i H.265 prikazana je na slici 7(a), gde se može videti da za NIR i VIS kanale razlika ima tendenciju zaravňjenja za vrednosti veće od QF=25. Za LWIR kanal razlika se povećava sa porastom vrednosti QF. Razlika srednjih vrednosti PSNR između standarda H.265 i H.266 je pozitivna za sve vrednosti QF osim za QF=5 i povećava se sa porastom vrednosti QF (slika 7(c)), što znači da za vrednosti QF veće od 5 standard H.265 nadmašuje standard H.266 u pogledu kvaliteta procenjenog korišćenjem PSNR.



Slika 7. Uporedni prikaz razlike srednjih vrednosti PSNR za osam video sekvenci po QF za sva tri kanala sračunate između: (a) H.264 i H.265, (b) H.264 i H.266 i (c) H.265 i H.266

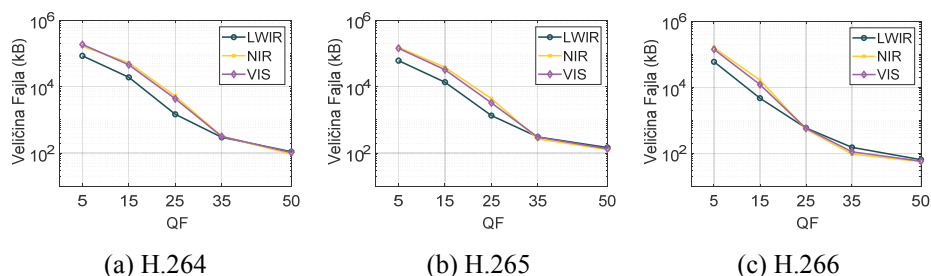
Slika 8 ilustruje poređenje srednjih vrednosti PSNR za osam video sekvenci po QF za sva tri kanala prema pojedinačnim standardima.

Za nivoe kvaliteta do QF=35, PSNR za LWIR kanal je veći nego za NIR i VIS kanale. Može se zaključiti da je za četiri prve QF vrednosti, gubitak kvaliteta izazvan H.264 standardom značajno veći za NIR i VIS kanale. Stoga je LWIR kanal najbolji za održavanje maksimalnog kvaliteta sa nižim nivoima kompresije dok se koristi kodek H.264. Dodatno se može uočiti da su krive zavisnosti PSNR od faktora kvaliteta kod NIR i VIS kanala preklapaju, a da od njih odstupaju krive koje se odnose na LWIR kanal.



Slika 8. Uporedni prikaz srednjih vrednosti PSNR za osam video sekvenci po QF za sva tri kanala i za: (a) H.264 standard, (b) H.265 standard i (c) H.266 standard

Analiza veličina fajlova po tipovima kompresije za sva tri kanala u funkciji faktora kvaliteta prikazana je na slici 9, sa koje se može uočiti da je za sve standarde i za niže faktore kvaliteta ($QF < 35$) kriva koja odgovara LWIR kanalu niža od krive NIR i VIS kanala. Za $QF > 35$ srednje veličine fajlova su skoro iste za sva tri kanala.

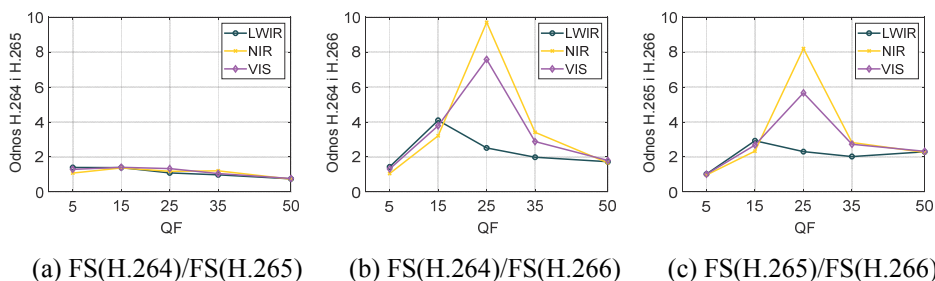


Slika 9. Uporedni prikaz srednjih vrednosti veličina fajlova za osam video sekvenci po QF za sva tri kanala i za: (a) H.264 standard, (b) H.265 standard i (c) H.266 standard

Da bi se uporedili standardi u smislu zauzeća memorije, za svaku kombinaciju standarda i za svaki QF izračunat je odnos srednje veličine fajla FS iz osam komprimovanih sekvenci. Rezultati su prikazani na slici 10. Primećuje se da se odnos veličina fajlova standarda H.264 i H.265 smanjuje kroz QF vrednosti za sva tri kanala (slika 10(a)). Na primer, za LWIR kanal i $QF=5$ $FS(H.264)/FS(H.265)=1.398$, dok je odnos niži za veće faktore kvaliteta: 0.97 za $QF=35$ i 0.75 za $QF=50$. Može se zaključiti da standard H.265 nadmašuje standard H.264 u smislu smanjenja veličine fajla za niže faktore kvaliteta ($QF < 35$).

Za odnos između standarda H.264 i H.266 rezultati dobijeni za LWIR kanal značajno se razlikuju od rezultata dobijenih za kanale NIR i VIS (slika 10(b)). Maksimalni odnos se dobija za $QF=25$ za NIR (9.7) i VIS (7.58) kanale, dok se za $QF=15$ dobija maksimalni odnos za LWIR kanal (4.1).

Sa slike 10(c) maksimalni odnos veličina fajlova između standarda H.265 i H.266 dobija se za NIR kanal za $QF=25$ (8.2). Za isti faktor kvaliteta, odnos veličina u VIS kanalu je 5.67, a u LWIR kanalu maksimalan odnos je 2.93 za $QF=15$. Može se zaključiti da su performanse standarda H.266 u odnosu na standard H.265 u pogledu zauzeća memorije bolje i da zavise od faktora kvaliteta i kanala.



Slika 10. Upporedni prikaz odnosa srednjih vrednosti veličina fajlova za osam video sekvenci po QF za sva tri kanala između: (a) H.264 i H.265, (b) H.264 i H.266 i (c) H.265 i H.266

4. Zaključak

U ovom radu je analizirana efikasnost kodovanja sa standardima video kompresije H.264/AVC/, H.265/HEVC/ i H.266/VVC/. Napravljen je skup od 360 komprimovanih sekvenci u cilju proučavanja performansi kodeka na signalima iz različitih delova elektromagnetnog spektra (vidljivi, NIR i LWIR delovi). Za sva tri kanala (VIS, NIR i LWIR), rezultati analize favorizuju upotrebu standarda H.265 i H.266 u odnosu na standard H.264, dok se performanse standarda H.265 i H.266 neznatno razlikuju po svim kanalima.

Prilikom analize uočeno je da je prednost jednog standarda u odnosu na drugi izraženija pri višim vrednostima faktora kvaliteta za kompletan skup. Takođe je zaključeno da standard H.266 daje najbolje rezultate u odnosu na druge standarde za vrednosti faktora kvaliteta između 15 i 25, gde je efikasnost standarda H.266 izraženija za NIR i VIS kanale u poređenju sa LWIR kanalom.

Analiza računске kompleksnosti pokazala je da standardi imaju duže trajanje kodovanja sekvenci za niže vrednosti QF (bolji vizuelni kvalitet) u poređenju sa trajanjem potrebnim za više vrednosti QF (lošiji vizuelni kvalitet). Ovaj efekat je najizraženiji za H.266 kodovanje, a najmanje izražen za H.264 kodovanje. Takođe je zaključeno da je u nekim situacijama vreme potrebno za kodovanje standardima H.264 i H.265 značajno niže (do 600 puta) u poređenju sa standardom H.266. Stoga su za ispunjavanje zahteva za korišćenje H.266 standarda u realnom vremenu potrebna dodatna poboljšanja.

Konačno, zaključuje se da iako je prednost H.266/VVC standarda u uštedi memorijskih resursa (poput arhiviranja 8K video sekvenci), za aplikacije sa radom u realnom vremenu, standard H.265/HEVC je pogodniji. Ovaj standard predstavlja očekivano poboljšanje u odnosu na standard H.264/AVC za sve kanale VIS, NIR i LWIR koji se sve više koristi, između ostalog, i u vojnim komunikacionim sistemima i aplikacijama. Ovu tvrdnju dodatno dokazuje činjenica da su određene vojne organizacije i savezi usvojili gore navedeni standard kao svoj prioritetni standard kompresije video podataka, koji se koristi i planira da se koristi u širokom spektru vojnih aplikacija i sistema.

Literatura

- [1] S. Liu, W. Bai, G. Liu, W. Li, and H. M. Srivastava, "Parallel fractal compression method for big video data," *Complexity*, vol. 2018, 2018.

- [2] O. Zelmati, *Subjektivna i objektivna procena kvaliteta slika iz infracrvenog dela elektromagnetnog spektra*, Doktorska disertacija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija, 2023.
- [3] R. Westwater and B. Furht, *Real-time video compression: techniques and algorithms*, vol. 376, Springer, 2007.
- [4] Z.-N. Li, M. S. Drew, and J. Liu, "Modern Video Coding Standards: H. 264, H. 265, and H. 266," in *Fundamentals of Multimedia*, ed: Springer, 2021, pp. 423-478.
- [5] G. J. Sullivan, J.-R. Ohm, W.-J. Han, and T. Wiegand, "Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard," *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, vol. 22, no. 12, pp. 1649-1668, 2012.
- [6] G. Sullivan, "Versatile video coding (vvc) arrives," in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, pp. 1-1. 2020.
- [7] A. Wiecekowski, J. Brandenburg, T. Hinz, C. Bartnik, V. George, G. Hege, et al., "VVenC: An open and optimized VVC encoder implementation," in *Proc. 2021 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW)*, pp. 1-2. 2021.
- [8] Y. Cheng, Q. Liu, C. Zhao, X. Zhu, and G. Zhang, "Design and implementation of media player based on Ffmpeg," in *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*, ed: Springer, pp. 867-874, 2012.
- [9] B. Pavlović, B. Bondžulić, N. Stojanović, M. Novčić, and D. Bujaković, "Comments on Objective Quality Assessment of MPEG-2, H. 264 and H. 265 Videos," in *Proc. 2018 New Trends in Signal Processing (NTSP)*, pp. 1-8. 2018.
- [10] Z. Wang and A. C. Bovik, "Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 26, no. 1, pp. 98-117, 2009.
- [11] K. S. Thyagarajan, *Still image and video compression with MATLAB*, John Wiley & Sons, 2011.

Abstract: *The paper analyzes the quality of H.264, H.265, and H.266 compressed video sequences in the visible (VIS), near-infrared (NIR), and long-wavelength infrared (LWIR) spectral ranges. To facilitate a comparison of compression standards, a database of compressed videos was formed. Eight sequences covering a wide range of content and scenarios with both fixed scenes and moving cameras were selected from the publicly available TRICLOBS database. For each standard, five different quality factors were adopted, resulting in 15 compressed video clips for the original video from each channel (VIS, NIR, and LWIR), forming a database of 360 compressed sequences. Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) was used for an objective assessment of video quality. The dependence of PSNR on the quality factor was analyzed for all three spectral ranges and three applied standards. In the conclusion of the paper, a comparative analysis of file sizes was provided by spectral range and applied standards.*

Keywords: *H.264, H.265, and H.266 compression, quality factor (QF), objective quality assessment, Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR).*

OBJECTIVE VIDEO QUALITY ASSESSMENT OF THE H.264, H.265 AND H.266 COMPRESSED VIDEO SEQUENCES

Boban Pavlović, Omar Zelmati

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.014>

PRIMENA PRAGA JEDVA UOČLJIVIH RAZLIKA U OBJEKTIVNOJ PROCENI KVALITETA JPEG KOMPRIMOVANIH SLIKA

Boban Bondžulić, Nenad Stojanović
Univerzitet odbrane u Beogradu – Vojna akademija
bondzulici@yahoo.com, nivzvuk@hotmail.com

Rezime: *U radu je pokazano da se primenom praga jedva uočljivih razlika značajno mogu unaprediti performanse vršnog odnosa signal/šum u proceni kvaliteta JPEG komprimovanih slika. Prag je određen na globalnom nivou, odnosno na nivou kompletne slike, predikcijom vršnog odnosa signal/šum koji odgovara granici između kompresije bez gubitka i sa gubitkom vizuelnih informacija. U predikciji su korišćena jednostavna obeležja (prostorna frekvencija i prostorna informacija) izvedena iz originalne nekomprimovane slike i kriva zadovoljstva korisnika komprimovanim sadržajem dobijena primenom dubokog učenja. Unapređenje je ilustrovano kroz dijagrame rasipanja i kvantitativne pokazatelje za šest javno dostupnih baza slika sa rezultatima subjektivnih testova, gde jedna baza sadrži slike iz infracrvenog dela elektromagnetnog spektra. Step unapređenja zavisi od načina predikcije praga uočljivih razlika i korišćene baze slika, ali se primenom predikcije izvedene iz jednostavnih obeležja dobijaju nešto lošiji rezultati nego kada se koristi predikcija izvedena iz krive zadovoljstva korisnika.*

Ključne reči: *jedva uočljive razlike (JND), JPEG kompresija, objektivna procena kvaliteta, vršni odnos signal/šum (PSNR)*

1. Uvod

Tehnike kompresije slike bez gubitka vizuelnih informacija poslednjih godina dobijaju na značaju zahvaljujući javno dostupnim bazama slika sa rezultatima subjektivnih testova. Cilj ovih tehnika jeste da se dobije komprimovana slika sa najvećim stepenom kompresije tako da posmatrač ne može razlikovati original od njegove komprimovane verzije. Ove tehnike su od posebnog značaja u daljinskom osmatranju i medicini, gde očuvanje vizuelnih informacija ima veliki uticaj na pravilnu interpretaciju podataka. U odnosu na tehnike kompresije bez gubitka informacija ostvaruje se dodatni stepen kompresije od približno osam puta [1].

Za razvoj tehnika kompresije bez gubitka vizuelnih informacija bitno je razumevanje vizuelnog sistema čoveka (engl. *Human Visual System*, HVS), a jedna od njegovih bitnih karakteristika je prag jedva uočljivih razlika (engl. *Just Noticeable Difference*, JND). Prag se može određivati na nivou kompletne slike, što je predmet istraživanja u ovom radu, na nivou regiona slike i na nivou pojedinačnih piksela [2]. JND

koncept se odnosi na određivanje minimalne razlike (prag vidljivosti ili vizuelna redundansa) između dva vizuelna signala koju će posmatrač detektovati. Ova razlika predstavlja granicu između kompresije bez i sa gubitkom vizuelnih informacija i odgovara prvoj JND tački. Korišćenjem slike koja odgovara prvoj JND tački može se odrediti druga JND tačka, odnosno niže JND tačke se koriste za određivanje viših JND tačaka. Predikcija pozicije prve JND tačke može biti realizovana kroz predikciju ciljne vrednosti objektivnog kvaliteta ili kroz predikciju parametra kojim se kontroliše kompresija (faktor kvaliteta, parametar kvantizacije, broj bita po pikselu, stepen kompresije). Pouzdani pristupi iz [3, 4] za predikciju vršnog odnosa signal/šum (engl. *Peak Signal-to-Noise Ratio*, PSNR) prve JND tačke koriste amplitudu gradijenta izvorne nekomprimovane slike, dok pristupi koji koriste tehnike dubokog učenja daju nešto veću pouzdanost predikcije [5].

U ovom radu je na šest javno dostupnih baza koje sadrže slike sa JPEG kompresijom pokazano da se značajno mogu unaprediti performanse PSNR objektivne mere u proceni kvaliteta JPEG komprimovanih slika uzimanjem u obzir vrednosti PSNR prve JND tačke. Dodatno je pokazano da stepen unapređenja zavisi od pristupa koji se koristi za predikciju pozicije prve JND tačke.

Rad je organizovan na sledeći način. Nakon uvodnog dela, u drugom delu rada opisani su pristupi koji se koriste za predikciju pozicije prve JND tačke. U trećem delu rada predstavljen je način na koji se predikcije pozicije prve JND tačke koriste za definisanje objektivne mere procene kvaliteta JPEG komprimovanih slika. Dodatno su date i analizirane performanse novouvedene objektivne mere kroz kvantitativne pokazatelje i dijagrame rasipanja. U poslednjem delu rada sumirani su najvažniji rezultati i dati pravci budućeg rada.

2. Predikcija pozicije prve JND tačke

Na slici 1 je prikazana originalna (nekomprimovana) slika iz MCL-JCI baze [6] i njene četiri JPEG komprimovane verzije (desne polovine) koje odgovaraju JND tačkama. Komprimovane verzije su dobijene za faktore kvaliteta 54, 29, 16 i 11, a koji su dobijeni na osnovu rezultata subjektivnih testova. Sa slike se jasno mogu uočiti razlike između komprimovanih slika, ali se razlike između originala i komprimovane slike koja odgovara prvoj JND tački mnogo teže uočavaju. Razlike se uočavaju u uniformnim regionima slike, dok se u regionima bogatim teksturom razlike slabo uočavaju.

Jednostavni pristupi za predikciju PSNR prve JND tačke (PSNR JND #1) iz [3, 4] koriste sliku u nijansama sive, a za konverziju slike u boji (RGB) dimenzija $N \times M$ u sivu sliku koriste standardnu konverziju:

$$F(n, m) = 0.299R(n, m) + 0.587G(n, m) + 0.114B(n, m), \quad (1)$$

gde su n i m prostorne koordinate ($n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots, M$). Nakon konverzije slike se snimaju u 64-bitni format, sa dinamičkim opsegom od 0 do 1. Oba pristupa za predikciju pozicije prve JND tačke koriste amplitudu gradijenta, pri čemu se u [3] koriste Sobel filterske maske:

$$g_x(n, m) = F(n+1, m+1) + 2 \cdot F(n+1, m) + F(n+1, m-1) - F(n-1, m-1) - 2 \cdot F(n-1, m) - F(n-1, m+1), \quad (2)$$

$$g_y(n, m) = F(n-1, m+1) + 2 \cdot F(n, m+1) + F(n+1, m+1) - F(n-1, m-1) - 2 \cdot F(n, m-1) - F(n+1, m-1), \quad (3)$$

$$SI(n, m) = \sqrt{g_x^2(n, m) + g_y^2(n, m)}, \quad (4)$$

dok se u [4] koriste razlike amplituda susednih piksela po redovima (RD) i kolonama (CD):

$$RD(n, m) = F(n, m) - F(n + 1, m), \quad (5)$$

$$CD(n, m) = F(n, m) - F(n, m + 1), \quad (6)$$

$$SF(n, m) = \sqrt{(RD(n, m))^2 + (CD(n, m))^2}. \quad (7)$$

Usrednjavanjem lokalnih vrednosti amplituda gradijenta se dobijaju obeležja slike poznata kao prostorna informacija (SI_{mean}) i prostorna frekvencija (SF_{mean}), a koja govore o kompleksnosti slike:

$$SI_{mean} = mean_{space} [SI] / g_{max}, \quad (8)$$

$$SF_{mean} = mean_{space} [SF]. \quad (9)$$

U prethodnim jednačinama sa g_{max} je označena eksperimentalno određena maksimalna vrednost amplituda gradijenta koja se dobija primenom Sobel maski za sive slike sa dinamičkim opsegom od 0 do 1 ($g_{max}=4.472$), dok je $mean_{space}$ oznaka za operaciju prostornog usrednjavanja.



(a) original

(b) JND #1, QF=54



(c) JND #2, QF=29

(d) JND #3, QF=16

(e) JND #4, QF=11

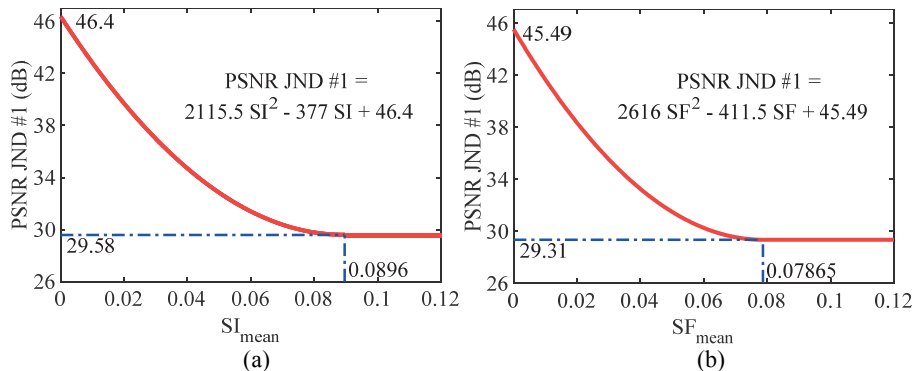
Slika 1. Originalna slika i njene četiri JPEG komprimovane verzije (desne polovine) koje odgovaraju pozicijama JND tačaka

Za predikciju PSNR JND #1 se u [3, 4] koriste zakoni preslikavanja drugog reda:

$$PSNR(SI) = \begin{cases} 2115.5 SI^2 - 377 SI + 46.4, & SI \leq 0.0896, \\ 29.58, & SI > 0.0896 \end{cases} \quad (10)$$

$$PSNR(SF) = \begin{cases} 2616 SF^2 - 411.5 SF + 45.49, & SF \leq 0.07865, \\ 29.31, & SF > 0.07865 \end{cases} \quad (11)$$

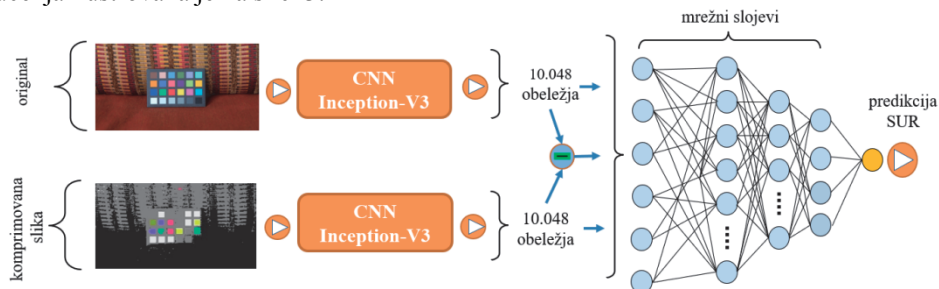
kod kojih su optimalne vrednosti parametara određene na osnovu rezultata subjektivnih testova MCL-JCI baze. Zakoni preslikavanja su prikazani na slici 2.



Slika 2. Predikcije vrednosti PSNR prve JND tačke na osnovu: (a) prostorne informacije i (b) prostorne frekvencije

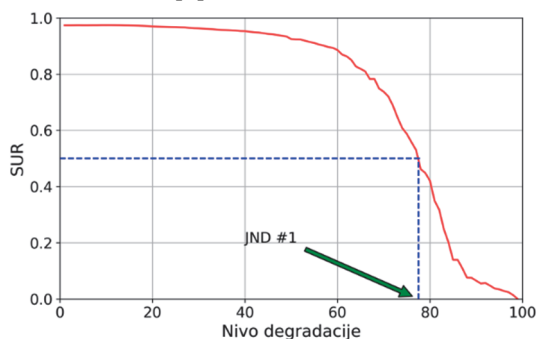
Sa slike 2 se može zaključiti da se sa povećanjem SI/SF vrednosti predikcija PSNR smanjuju do minimuma funkcije preslikavanja ($PSNR_{\min}=29.58$ dB, odnosno $PSNR_{\min}=29.31$ dB). Na ovaj način se kod slika koje sadrže regione neuniformnog sadržaja (veće SI/SF vrednosti) može tolerisati veći stepen degradacije nego kod regiona sa homogenim sadržajem (niže SI/SF vrednosti). Takođe, blokovskom JPEG kompresijom se potiskuju visokofrekvencijske komponente. U homogenim regionima sa postepenim promenama boje/intenziteta, blokovske efekte će posmatrač uočiti. Nasuprot tome, degradacije su manje uočljive u regionima bogatim teksturom.

Za predikciju pozicije prve JND tačke se u [5] koristi stepen zadovoljnih korisnika (engl. *Satisfied User Ratio*, SUR) komprimovanim sadržajem dobijen primenom dubokog učenja. Predikcija SUR koristeći SUR-FeatNet model dubokog učenja ilustrovana je na slici 3.



Slika 3. Upotreba SUR-FeatNet modela za predikciju SUR krive

Inception neuralna mreža se koristi za izdvajanje obeležja iz izvorne i komprimovane slike [5, 7]. Nakon toga, vektori obeležja se porede korišćenjem neuralne mreže. Dobijeni SUR skor se arhivira za svaki nivo degradacije. Na kraju ovog procesa dobija se SUR vektor sa 100 vrednosti koje odgovaraju svakom nivou degradacije, kao što je prikazano na slici 4. Ova slika dodatno prikazuje određivanje pozicije prve JND tačke (JND #1) za prvu sliku u MCL-JCI bazi, gde se pozicija određuje na osnovu 50% od maksimalne vrednosti SUR krive. U ovom primeru JND #1 se dobija za nivo degradacije 77 (faktor kvaliteta JPEG kompresije je 23), što odgovara JND #1 tački dobijenoj u subjektivnim testovima [5].



Slika 4. Ilustracija određivanja prve JND tačke korišćenjem SUR krive

3. Rezultati i analiza rezultata

Kako bi se rezultati objektivne evaluacije učinili nezavisnim od sadržaja originalne slike, autori iz [3] su predložili da se koristi diferencijalni PSNR (DPSNR), a koji se dobija kao razlika između PSNR i predikcije PSNR JND #1:

$$DPSNR = PSNR - PSNR \text{ JND \#1} . \quad (12)$$

DPSNR vrednosti mogu biti pozitivne i negativne. Pozitivne vrednosti odgovaraju slikama dobrog kvaliteta ($PSNR > PSNR \text{ JND \#1}$), dok negativne vrednosti odgovaraju slikama lošijeg kvaliteta. Takođe, DPSNR se može razmatrati kao JND mera za objektivnu procenu kvaliteta slike.

U tabeli 1 dati su kvantitativni pokazatelji stepena slaganja između subjektivnih i PSNR/DPSNR objektivnih skorova kvaliteta za šest baza slika – LIVE [8], CSIQ [9], VCL@FER [10], TID2008 [11], LWIR [12] i MCL-JCI [6]. Kao kvantitativni pokazatelji koriste se Pirsonov koeficijent linearne korelacije (engl. *Pearson's Linear Correlation Coefficient*, PLCC), Spirmanova korelacija rangova (engl. *Spearman's Rank-Order Correlation Coefficient*, SROCC), srednja apsolutna greška (engl. *Mean Absolute Error*, MAE), koren srednje kvadratne greške (engl. *Root Mean Square Error*, RMSE) i stepen odstupanja (engl. *Outlier Ratio*, OR) između subjektivnih i objektivnih skorova nakon nelinearne regresije korišćenjem logističke funkcije sa četiri parametra [13]. Pored performansi DPSNR mera, u tabeli su date performanse konvencionalne PSNR mere, kao i tri mere koje koriste osobine HVS – PSNR-HVS [14], PSNR-HVS-M [15] i WNMAE [16]. WNMAE mera koristi JND model na nivou piksela, dok PSNR-HVS i PSNR-HVS-M razmatraju funkciju osetljivosti HVS na kontrast i maskiranje kontrasta. Za svaku od baza i po svakom od kriterijuma dva najbolja rezultata su podebljana.

Tabela 1. Poređenje performansi objektivnih mera na šest baza

Baza	Mera	PLCC	SROCC	MAE	RMSE	OR [%]
LIVE	PSNR	0.8879	0.8809	11.3594	14.6532	12.5714
	WNMAE	0.9143	0.9113	9.9537	12.9013	5.7143
	PSNR-HVS	0.9585	0.9478	7.1802	9.0760	1.1429
	PSNR-HVS-M	0.9752	0.9650	5.5549	7.0493	0.0000
	DPSNR (SI _{mean})	0.9649	0.9565	6.5225	8.3637	1.1429
	DPSNR (SF _{mean})	0.9636	0.9528	6.6269	8.5199	0.5714
	DPSNR (SUR-FeatNet)	0.9756	0.9678	5.4674	6.9950	0.0000
CSIQ	PSNR	0.8906	0.8879	0.0964	0.1391	31.3333
	WNMAE	0.8971	0.8962	0.0946	0.1352	34.0000
	PSNR-HVS	0.9577	0.9400	0.0603	0.0880	22.6667
	PSNR-HVS-M	0.9733	0.9512	0.0501	0.0702	20.0000
	DPSNR (SI _{mean})	0.9707	0.9510	0.0547	0.0735	19.3333
	DPSNR (SF _{mean})	0.9740	0.9543	0.0513	0.0694	17.3333
	DPSNR (SUR-FeatNet)	0.9767	0.9560	0.0515	0.0656	15.3333
VCL@FER	PSNR	0.6041	0.6040	13.6027	16.7039	69.5652
	WNMAE	0.6252	0.6279	13.2803	16.3580	71.7391
	PSNR-HVS	0.8741	0.8775	7.8178	10.1823	48.5507
	PSNR-HVS-M	0.9408	0.9388	5.5695	7.1051	33.3333
	DPSNR (SI _{mean})	0.8269	0.8262	9.2646	11.7856	52.1739
	DPSNR (SF _{mean})	0.8465	0.8456	8.8195	11.1601	52.8986
	DPSNR (SUR-FeatNet)	0.8858	0.8878	7.5386	9.7268	41.3043
TID2008	PSNR	0.8698	0.8717	0.6768	0.8403	NA
	WNMAE	0.8967	0.9017	0.5933	0.7540	
	PSNR-HVS	0.9720	0.9577	0.3139	0.4001	
	PSNR-HVS-M	0.9823	0.9338	0.2513	0.3186	
	DPSNR (SI _{mean})	0.9489	0.9215	0.4317	0.5374	
	DPSNR (SF _{mean})	0.9557	0.9259	0.3828	0.5014	
	DPSNR (SUR-FeatNet)	0.9287	0.8834	0.4276	0.6319	
	DPSNR (SUR-FeatNet)*	0.9625	0.9185	0.3492	0.4580	
LWIR	PSNR	0.8377	0.8146	0.4362	0.5650	59.0000
	WNMAE	NA				
	PSNR-HVS	0.8238	0.8018	0.4573	0.5865	63.0000
	PSNR-HVS-M	0.8389	0.8135	0.4492	0.5631	65.0000
	DPSNR (SI _{mean})	0.9481	0.9238	0.2596	0.3290	45.0000
	DPSNR (SF _{mean})	0.8927	0.8705	0.3765	0.4663	56.0000
	DPSNR (SUR-FeatNet)	0.9478	0.9216	0.2666	0.3297	46.0000
MCL-JCI	PSNR	0.4721	0.4486	0.1907	0.2288	NA
	WNMAE	0.4783	0.4665	0.1899	0.2279	
	PSNR-HVS	0.7679	0.7506	0.1328	0.1662	
	PSNR-HVS-M	0.8584	0.8456	0.1026	0.1331	
	DPSNR (SI _{mean})	0.7973	0.7930	0.1222	0.1566	
	DPSNR (SF _{mean})	0.9058	0.8977	0.0852	0.1099	
	DPSNR (SUR-FeatNet)	0.9559	0.9552	0.0556	0.0762	

* - bez četiri slike koje potiču od originala i25.bmp (nije slika prirodne scene)

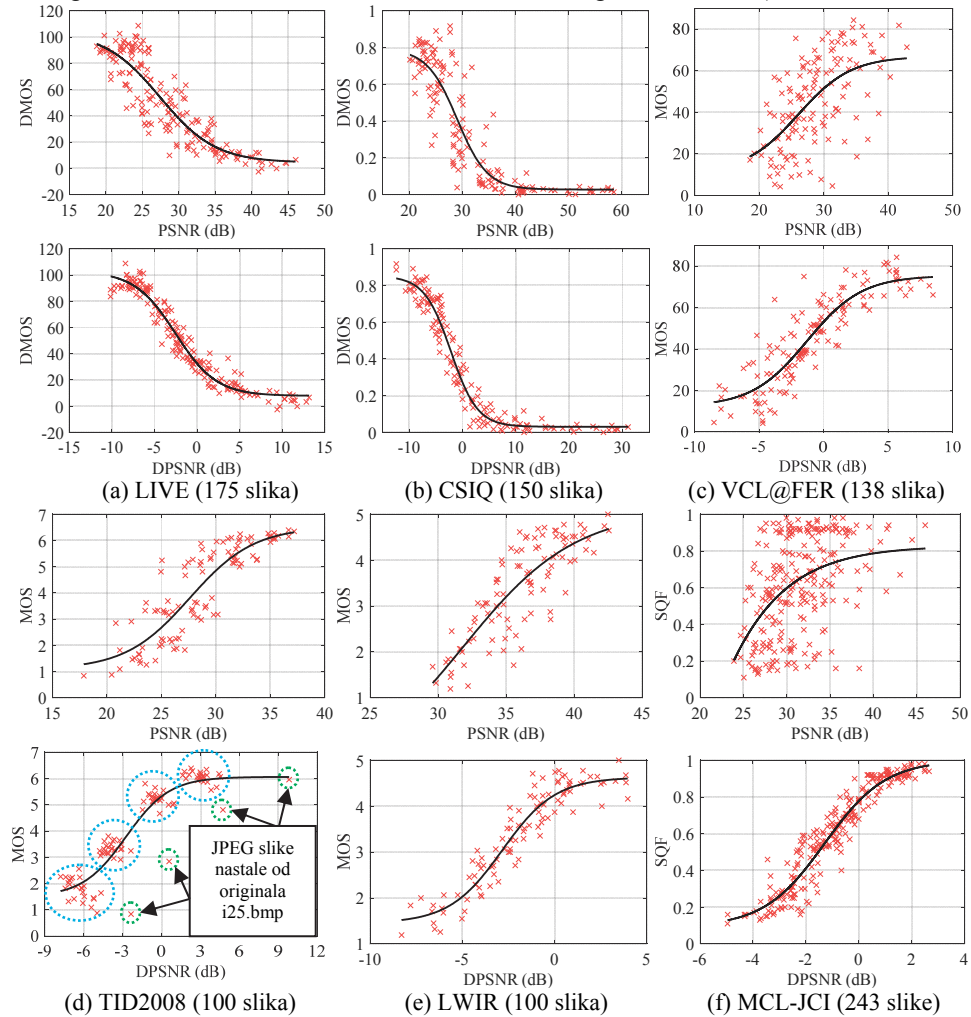
Iz tabele 1 se može zaključiti da se uzimanjem u obzir prve JND tačke dobijaju DPSNR skorovi koji imaju značajno veći stepen slaganja od skorova dobijenih primenom konvencionalnog PSNR pristupa kod koga rezultati značajno zavise od sadržaja izvornog signala [17]. Dobitak je ostvaren nezavisno od toga na koji način je izvršena predikcija pozicije prve JND tačke – korišćenjem SI_{mean} , SF_{mean} ili SUR-FeatNet pristupa. Ako se razmatra stepen slaganja skorova tri DPSNR pristupa i subjektivnih skorova, osim na LWIR bazi infracrvenih slika, on je najveći ukoliko se za predikciju koristi SUR-FeatNet pristup sa dubokim učenjem. Razlika u performansama DPSNR pristupa je naročito izražena na VCL@FER i MCL-JCI bazama. Ako se kao kvantitativna mera posmatra koeficijent PLCC, može se zaključiti da je DPSNR (SUR-FeatNet) pristup najlošije rezultate ostvario na VCL@FER bazi (PLCC=88.58%), što je verovatno posledica loših performansi konvencionalne PSNR mere (PLCC=60.41%). Na preostalom bazama koeficijent korelacije PLCC je veći od 94%. Iako su performanse PSNR mere na MCL-JCI bazi loše (PLCC=47.21%), performanse DPSNR (SUR-FeatNet) pristupa su značajno bolje od PSNR, ali i od ostalih pristupa, PLCC=95.59%, a čemu je doprinelo obučavanje SUR-FeatNet modela na ovoj bazi.

Od standardnih pristupa koji su analizirani najbolje slaganje sa rezultatima subjektivnih testova ostvareno je primenom PSNR-HVS-M objektivne mere. Performanse DPSNR (SUR-FeatNet) pristupa su u nivou performansi ove mere na LIVE, CSIQ i TID2008 bazama, a bolje su na LWIR i MCL-JCI bazama. Najlošije performanse ima PSNR objektivna procena kvaliteta, dok su performanse WNMAE objektivne mere nešto bolje. Kvantitativni pokazatelji slaganja subjektivnih i WNMAE objektivnih skorova ne mogu da se sračunaju za LWIR bazu jer je WNMAE mera namenjena proceni kvaliteta slika u boji, a infracrvene slike LWIR baze su u nijansama sive.

Na slici 5 prikazani su dijagrami rasipanja subjektivnih i objektivnih skorova kvaliteta zajedno sa optimalnim regresionim funkcijama na šest baza koje sadrže slike sa JPEG kompresijom. Na ovim dijagramima svaka tačka odgovara jednoj test (komprimovanoj) slici, gde su na apscisi vrednosti objektivnih, a na ordinati vrednosti subjektivnih skorova kvaliteta. U ovim bazama rezultati subjektivnih testova dati su kroz prosečne subjektivne skorove – MOS (engl. *Mean Opinion Score*), diferencijalne MOS skorove, DMOS, i SQF (engl. *Stair Quality Function*) skorove. Od objektivnih mera prikazani su rezultati konvencionalne PSNR mere i DPSNR mere dobijene korišćenjem SUR-FeatNet algoritma predikcije pozicije prve JND tačke.

Sa slike 5 se može zaključiti da se rasipanje skorova kvaliteta značajno smanjuje primenom DPSNR mere u odnosu na konvencionalni PSNR pristup. Rasipanje oko regresione krive je najmanje na LIVE i CSIQ bazama, a kod kojih su rezultati subjektivnih skorova predstavljeni kroz diferencijalne (DMOS) skorove kvaliteta. Takođe, može se zaključiti da se rasipanje značajno smanjilo i na LWIR bazi koja sadrži slike iz infracrvenog dela elektromagnetnog spektra, iako je SUR-FeatNet model obučan na slikama iz vidljivog dela (MCL-JCI baza). Uočava se značajno smanjenje rasipanja na MCL-JCI bazi, a na kojoj je i izvršeno obučavanje. Interesantni su i rezultati na TID2008 bazi gde su se skorovi nakon primene DPSNR pristupa grupisali u četiri skupa (oivičena na slici 5d), a koji odgovaraju nivoima degradacije (četiri nivoa) korišćenim prilikom formiranja baze. Takođe, mogu se uočiti četiri tačke koje odstupaju od trenda većine. Dodatnom analizom utvrđeno je da te četiri tačke (obeležene na slici 5d) odgovaraju

komprimovanim verzijama izvorne slike i25.bmp, a koja je veštački generisana (u treningu SUR-FeatNet modela nisu korišćene veštački generisane slike).



Slika 5. Dijagrami rasipanja subjektivnih (MOS/DMOS/SQF) i objektivnih (PSNR/DPSNR) skorova kvaliteta na šest baza slika sa JPEG kompresijom

4. Zaključak

Uvođenje pozicije prve JND tačke u objektivnu procenu kvaliteta JPEG slika dovelo je do značajnog unapređenja stepena slaganja subjektivnih i PSNR objektivnih skorova kvaliteta. Unapređenje je ostvareno zbog smanjenja zavisnosti objektivnih PSNR procena kvaliteta od sadržaja izvornog signala. Stepun unapređenja zavisi od načina predikcije pozicije prve JND tačke, kao granice između kompresije bez i sa gubitkom vizuelnih informacija. Unapređenje je ilustrovano primenom tri pristupa predikcije na šest baza koje sadrže slike sa JPEG kompresijom. Najveći dobitak je ostvaren primenom

predikcije na osnovu krive zadovoljstva korisnika komprimovanim sadržajem dobijene primenom dubokog učenja.

Obučavanje SUR-FeatNet modela sa dubokim učenjem izvršeno je na javno dostupnoj JND bazi sa 50 izvornih slika. Za očekivati je da će performanse modela, a i objektivnih procena, biti dodatno unapređene proširenjem skupa za obučavanje sa slikama i rezultatima JND testova iz KonJND_1k baze (sa 504 slike i JND testovima na JPEG slikama). Dodatno se uvedeni pristup procene kvaliteta korišćenjem pozicije prve JND tačke može proveriti i na BPG tipu kompresije jer KonJND_1k baza sadrži i rezultate JND testova sa ovim tipom kompresije (na 504 slike).

Performanse novouvedene objektivne mere (diferencijalni PSNR), osim od predikcija vrednosti PSNR prvih JND tačaka, zavise i od performansi konvencionalne PSNR mere. Ukoliko su performanse PSNR mere loše (kao što je to slučaj na VCL@FER bazi), za očekivati su lošije performanse diferencijalnog pristupa u proceni kvaliteta. Zbog toga se u budućem radu može istražiti primena diferencijalnog pristupa kod drugih objektivnih mera procene kvaliteta.

Literatura

- [1] B. Bondžulić, V. Lukin, D. Bujaković, F. Li, S. Kryvenko, and B. Pavlović, "On visually lossless JPEG image compression", in *Proc. Zooming Innov. Consum. Technol. Conf.*, pp. 113-118, 2023. DOI: 10.1109/ZINC58345.2023.10174090
- [2] H. Liu, Y. Zhang, H. Zhang, C. Fan, S. Kwong, C.-C. J. Kuo, and X. Fan, "Deep learning based picture-wise just noticeable prediction model for image compression", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 29, pp. 641-656, 2020. DOI: 10.1109/TIP.2019.2933743
- [3] B. Bondžulić, B. Pavlović, N. Stojanović, and V. Petrović, "Picture-wise just noticeable difference prediction model for JPEG image quality assessment", *Vojnotehnički glasnik - Mil. Tech. Cour.*, vol. 70, no. 1, pp. 62-86, 2022. DOI: 10.5937/vojtechg70-34739
- [4] B. Pavlović, B. Bondžulić, N. Stojanović, V. Petrović, and D. Bujaković, "Prediction of the first just noticeable difference point based on simple image features", in *Proc. Zooming Innov. Consum. Technol. Conf.*, pp. 125-130, 2023. DOI: 10.1109/ZINC58345.2023.10173865
- [5] H. Lin, V. Hosu, C. Fan, Y. Zhang, Y. Mu, R. Hamzaoui, and D. Saupe, "SUR-FeatNet: Predicting the satisfied user ratio curve for image compression with deep feature learning", *Qual. User Exp.*, vol. 5, no. 5, pp. 1-23, 2020. DOI: 10.1007/s41233-020-00034-1
- [6] L. Jin, J.Y. Lin, S. Hu, H. Wang, P. Wang, I. Katsavounidis, A. Aaron, and C.-C. J. Kuo, "Statistical study on perceived JPEG image quality via MCL-JCI dataset construction and analysis", in *Proc. IS&T Int. Symp. Electron. Imaging*, art. number: IQSP-222, 2016. DOI: 10.2352/ISSN.2470-1173.2016.13.IQSP-222
- [7] O. Zelmati, *Subjektivna i objektivna procena kvaliteta slika iz infracrvenog dela elektromagnetnog spektra*, Doktorska disertacija, Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija, 2023.
- [8] H.R. Sheikh, M.F. Sabir, and A.C. Bovik, "A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms", *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 15, no. 11, pp. 3440-3451, 2006. DOI: 10.1109/TIP.2006.881959

- [9] E.C. Larson and D.M. Chandler, "Most apparent distortion: Full-reference image quality assessment and the role of strategy", *J. Electron. Imaging*, vol. 19, no. 1, art. number: 011006, 2010. DOI: 10.1117/1.3267105
- [10] A. Zarić, N. Tatalović, N. Brajković, H. Hlevnjak, M. Lončarić, E. Dumić, and S. Grgić, "VCL@FER image quality assessment database", *Automatika*, vol. 53, no. 4, pp. 344-354, 2012. DOI: 10.7305/automatika.53-4.241
- [11] N. Ponomarenko, V. Lukin, A. Zelensky, K. Egiazarian, M. Carli, and F. Battisti, "TID2008 - A database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics", *Adv. Mod. Radioelectron.*, vol. 10, no. 4, pp. 30-45, 2009.
- [12] O. Zelmati, B. Bondžulić, B. Pavlović, I. Tot, and S. Merrouche, "Study of subjective and objective quality assessment of infrared compressed images", *J. Electr. Eng.*, vol. 73, no. 2, pp. 73-87, 2022. DOI: 10.2478/jee-2022-0011
- [13] *Objective perceptual assessment of video quality: Full reference television*, ITU-T Telecommunication Standardization Sector, 2004.
- [14] K. Egiazarian, J. Astola, N. Ponomarenko, V. Lukin, F. Battisti, and M. Carli, "Two new full-reference quality metrics based on HVS", in *Proc. 2nd Int. Workshop Video Process. Qual. Metrics Consum. Electron. – VPQM*, pp. 1-4, 2006.
- [15] N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, and V. Lukin, "On between-coefficient contrast masking of DCT basis function", in *Proc. 3rd Int. Workshop Video Process. Qual. Metrics Consum. Electron. – VPQM*, pp. 1-4, 2007.
- [16] S. Toprak and Y. Yalman, "A new full-reference image quality metric based on just noticeable difference", *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 50, pp. 18-25, 2017. DOI: 10.1016/j.csi.2016.08.003
- [17] Q. Huynh-Thu and M. Ghanbari, "Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment", *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 13, pp. 800-801, 2008. DOI: 10.1049/el:20080522

Abstract: *In this paper, it is shown that the application of the just noticeable difference threshold can significantly improve the performance of the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) in the quality assessment of JPEG compressed images. The threshold is determined globally, at the level of the complete image, by predicting the PSNR corresponding to the boundary between visually lossless and visually lossy compression. In the prediction, simple features (spatial frequency and spatial information) derived from the original uncompressed image and the satisfied user ratio curve obtained by applying deep learning model are used. The improvement is illustrated through scatter plots and quantitative indicators for six publicly available image databases with the results of subjective tests, among which one database contains images from the infrared part of the electromagnetic spectrum. The degree of improvement depends on the just noticeable difference threshold prediction method and the image database used. Applying a prediction derived from simple features provides slightly worse results than the results when a prediction based on the satisfied user ratio curve is used.*

Keywords: *Just Noticeable Difference (JND), JPEG compression, objective quality assessment, Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)*

APPLICATION OF JUST NOTICEABLE DIFFERENCE THRESHOLD IN THE OBJECTIVE QUALITY ASSESSMENT OF JPEG COMPRESSED IMAGES

Boban Bondžulić, Nenad Stojanović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.015>

MODELI DUBOKOG UČENJA ZA KLASIFIKACIJU SLIKA PRIMENOM KONVOLUCIONIH NEURONSKIH MREŽA

Andreja Samčović, Nikola Matijašević, Marko Đogatović

Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

andrej@sf.bg.ac.rs, m.djogatovic@sf.bg.ac.rs, nikola.matijasevic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Obuka računarskog vida se realizuje korišćenjem dubokog učenja. Duboko učenje se može primeniti za rešavanje raznih problema klasifikacije. Za ovaj tip problema, kao najbolje rešenje pokazalo se korišćenje konvolucionih neuronskih mreža. One su napravile revoluciju u oblasti prepoznavanja slika, pružajući visoku preciznost koja je ranije bila nedostižna. Konkretno, neki od relevantnih modela konvolucionih neuronskih mreža su ResNet50, VGG16 i VGG19. U ovom radu je objašnjena generalna struktura i princip rada konvolucionih neuronskih mreža kroz njihove slojeve. Takođe, dat je i prikaz arhitekture i performansi pomenutih modela koji se koriste u zadacima klasifikacije slika. Takođe, objašnjeni su koncepti kao što su prenosno učenje i augmentacija podataka.*

Glavne reči: *duboko učenje, konvolucione neuronske mreže, ResNet50, VGG16, VGG19.*

1. Uvod

Čovek se u svom životu oslanja na nekoliko osnovnih ljudskih čula, među kojima se nalazi i čulo vida. Ovo čulo se koristi radi upoznavanja i analize okruženja kroz slanje slika ka mozgu na obradu, što ga čini značajnim u odvijanju svakodnevnih životnih i radnih aktivnosti čoveka. Ovaj proces je bolje poznat kao ljudski vid (vizija). Analogno tome, računarska vizija (*computer vision*) predstavlja korišćenje senzora za prikupljanje informacija u obliku slike i slanje ka računaru na dalju obradu. Time se omogućava računarima da ekstrahuju značajne informacije iz digitalnih zapisa (slike, video snimci i sl.) i da na osnovu njih preduzmu određene aktivnosti ili da pruže preporuke. Kako bi se to postiglo, računari koriste kamere, velike skupove podataka, razne zahtevne algoritme i sl. To je proces koji se naziva obukom računarskog vida za rešavanje raznih problema.

Obuka se realizuje kroz algoritme mašinskog učenja nad skupovima podataka sa ciljem imitacije načina na koji ljudi uče i postepenog poboljšavanja preciznosti. Izbor algoritama zavisi od tipa podataka i problema koji je potrebno rešiti. Nakon obuke, ideja je da se dođe do predikcija nad novim skupom podataka sličnog tipa. Polje mašinskog učenja koje je veoma aktuelno se odnosi na duboko učenje. Razlog za to jesu zavidni

rezultati [1][2] koji su dobijeni pri rešavanju problema kao što su prepoznavanje raznih objekata poput lica, oboljenja, ljudskih emocija, itd. Svi ovi problemi se svode na posmatranje slika, detekciju karakterističnih osobina i klasifikaciju. Glavni razlog za razmatranje ovih problema jeste taj što ljudska procena ne može biti pouzdana u potpunosti. Zato se prilazi sa ciljem da računarska vizija postane superiornija u odnosu na ljudski vid tj. da mašina može klasifikovati slike sa većom preciznošću nego što bi to mogao da uradi čovek. U okviru dubokog učenja koriste se konvolucione neuronske mreže koje su pogodne za rešavanje ovog tipa problema. U ovom radu, fokus će biti na predstavljanju tri postojeća modela konvolucionih neuronskih mreža.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način. U drugom poglavlju, objašnjavaju se duboke neuronske mreže, gde je fokus na konvolucionim neuronskim mrežama, njenoj strukturi i principu rada, ali i podacima koji se koriste za njihovu obuku. Cilj trećeg poglavlja je prikaz izabranih modela konvolucionih neuronskih mreža i njihovih karakteristika. Četvrto poglavlje govori o konceptima prenosnog učenja i augmentacije podataka. Poslednje poglavlje daje zaključna razmatranja rada.

2. Konvolucione neuronske mreže

Duboko učenje (*deep learning*), kao podoblast mašinskog učenja, se konstantno menja. To se najviše odnosi na modele, funkcije i algoritme koji se koriste u ovoj podoblasti. Duboko učenje se posmatra kroz jedan od tri glavnih tipova [3]: Višeslojni perceptron (*Multi-Layer Perceptron*, MLP), Konvolucione neuronske mreže (*Convolutional Neural Networks*, CNN), kao i Rekurentne neuronske mreže (*Recurrent Neural Networks*, RNN).

Konvolucione neuronske mreže, kao glavni fokus ovog rada, su inspirisane biološkim nervnim sistemom (npr. ljudski mozak). One se sastoje od različitih slojeva, gde svaki sloj ima određeni broj čvorova (neurona). Čvorovi su međusobno povezani tako da izlaz nekog čvora iz sloja predstavlja ulaz čvora u narednom sloju. Jedan od najranijih radova koji se odnosi na korišćenje konvolucionih neuronskih mreža objavljen je 1998. godine [4]. U tom radu, predstavljen je jednostavan CNN model (*LeNet-5*) koji omogućava ekstrahovanje jednostavnijih karakterističnih osobina podataka i njihovu agregaciju čime se dobijaju složenije karakteristične osobine podataka. Primena ovog CNN modela je ograničena na rešavanje problema prepoznavanja ljudskog rukopisa tj. ručno napisanih cifara sa slike. To se postiže kroz obuku modela tako što mu se proslede slike cifara iz kojih on može da ekstrahuje karakteristične osobine. Od modela se očekuje tačna predikcija cifre koja je prikazana na slici koja se ne nalazi u skupu za obuku. Kako bi se sve ovo realizovalo, potrebno je posedovati hardver visokih specifikacija jer je obuka modela veoma računarski zahtevna. Kao glavni računarski resurs koji se ističe za obuku modela jesu grafičke kartice. One pružaju mogućnost paralelnog izvršavanja više operacija zbog velikog broja jezgara za obradu (*Graphical Processing Unit*, GPU) od kojih se sastoje.

2.1. Podaci za obuku

Glavni preduslov koji je potrebno zadovoljiti kako bi se koristili CNN modeli jeste postojanje odgovarajućih baza podataka. Ovo ne treba zanemariti jer one igraju

ključnu ulogu u obuci svakog CNN modela. Neke od korišćenijih i poznatijih baza podataka će biti objašnjene u nastavku.

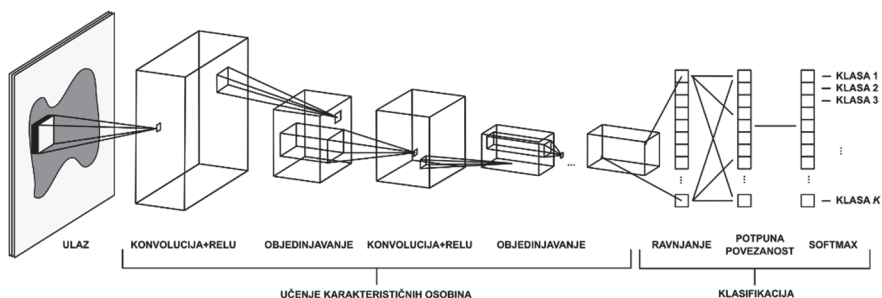
Proces obuke prethodno spomenutog *LeNet-5* modela je sproveden pomoću MNIST (*Modified National Institute of Standards and Technology*) baze podataka [5]. Ova baza je objavljena još 1998. godine i sastoji se od slika na kojima se nalaze ručno napisani jednocifreni brojevi. Te slike su uparene sa odgovarajućom oznakom (labelom) kojih ima ukupno 10 (od 0 do 9). Ova baza podataka se deli na skup za obuku i skup za testiranje. Prvi skup se sastoji od 60 hiljada slika, dok drugi skup ima 10 hiljada slika. Brojevi na slikama su centrirani. Slike su binarne (crno-bele) i njihova visina i širina iznosi 28 piksela.

Sledeća baza podataka koja će biti predstavljena jeste CIFAR (*Canadian Institute For Advanced Research*) objavljena 2009. godine [6]. Ova baza podataka dolazi sa 10 (CIFAR-10) ili 100 (CIFAR-100) klasa. CIFAR-10 se sastoji od 60 hiljada slika gde se u svakoj klasi nalazi 6 hiljada slika. U skupu za obuku se koristi 50000 slika, dok se u skupu za testiranje nalazi 10 hiljada slika. Slike su u RGB (*Red Green Blue*) formatu i njihova visina i širina iznosi 32 piksela. Klase predstavljaju slike određenih predmeta i životinja. Sa druge strane, CIFAR-100 je ista kao i CIFAR-10 osim što se sastoji od 100 klasa gde svaka ima 600 slika. Skupovi za obuku i testiranje sadrže 500 i 100 slika po svakoj klasi, respektivno. Svih 100 klasa je grupisano u 20 super klasa. Super klase sačinjavaju slike klase iste vrste (istog tipa).

Poslednja baza podataka je *ImageNet* koja je objavljena 2009. godine od strane Univerziteta u Princetonu [7]. Ova baza podataka se konstantno ažurira. Sastoji se od preko 20 hiljada klasa i od preko 14 miliona slika. Međutim, najčešće se koristi skraćena verzija ove baze podataka koja se sastoji od hiljadu klasa i preko 1,2 miliona slika za obuku, 50 hiljada slika za validaciju i 100 hiljada slika za testiranje. Skraćena verzija se naziva *ImageNet-1K*. Slike su u RGB formatu i variraju po pitanju visine i širine. Za neke klase, dimenzije najveće slike su 4.288 i 2.848 piksela, dok su dimenzije najmanje slike 75 i 56 piksela. Slike se obično svode na iste pre njihovog učitavanja u model.

2.2. Struktura i princip rada

CNN se sastoji od dela za izdvajanje karakterističnih osobina (učenje svojstava) ulaznih podataka i od dela za određivanje odgovarajuće klase kojoj ulazni podaci pripadaju (rešavanje problema klasifikacije). Zajedničko im je to što se grade od posebnih elemenata koji se nazivaju slojevima. Kada je u pitanju problem klasifikacije sa više klasa, uopštena struktura CNN modela je data Slikom 1.



Slika 1. Struktura modela konvolucione neuronske mreže

Kroz primer klasifikacije slike može se objasniti struktura CNN modela. Na ulaz u CNN model se prosledi slika. Nakon toga, nastupa učenje karakterističnih osobina ulaznih podataka koja obuhvata kombinaciju konvolucionih slojeva i slojeva za objedinjavanje (*pooling*). Jedna od najčešćih aktivacionih funkcija koja se koristi u konvolucionim slojevima je *Rectified Linear Unit* (ReLU) [8]. ReLU funkcija je opisana sledećom matematičkom formulacijom:

$$relu(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Ova funkcija vraća vrednost 0 ukoliko joj je prosledjena negativna vrednost, dok u svim ostalim slučajevima vraća onu vrednost koja joj je prosledjena. Sloj za objedinjavanje omogućava spajanje nekoliko vrednosti u jednu (najčešće najveću). Deo CNN modela koji se odnosi na učenje karakterističnih osobina se može sastojati od više konvolucionih slojeva i slojeva za objedinjavanje. Od različitih načina kombinovanja ovih slojeva zavisi koliko dobro će model moći da nauči podatke. Druga celina CNN modela se odnosi na klasifikaciju i sastoji se od sloja za ravnjanje (*flatten*), potpuno povezanih slojeva i odgovarajuće aktivacione funkcije. Kada je u pitanju rešavanje problema kod kojeg se javlja više od 2 klase koristi se *softmax* aktivaciona funkcija [9]. Suština ove aktivacione funkcije jeste da joj se prosleđuje vektor čije se vrednosti transformišu na interval od 0 do 1. Kako je suma transformisanih vrednosti vektora jednaka 1, te vrednosti se mogu tumačiti kao verovatnoće pripadnosti klasama. Najveća dobijena verovatnoća predstavlja predikciju CNN modela da slika pripada klasi kojoj odgovara ta verovatnoća. Matematička formulacija vektorske *softmax* aktivacione funkcije je data jednačinom:

$$softmax(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sum_{j=1}^K e^{x_j}} [e^{x_1} \quad \dots \quad e^{x_K}]^T, \quad (2)$$

gde je \mathbf{x} vektor definisan kao $\mathbf{x} = [x_1 \quad \dots \quad x_K]$, pri čemu je K broj klasa.

Slojevi se dele na više grupa. U ovom radu, fokus je na slojevima koji su korišćeni u izradi aktuelnih CNN modela, a pripadaju grupi [10]: glavnih slojeva, konvolucionih slojeva, slojeva za objedinjavanje, slojeva za regularizaciju i slojeva za preoblikovanje.

Iz grupe glavnih slojeva, korišćen je potpuno povezan (*dense*) sloj. On se koristi za povezivanje neurona između dva različita sloja. Izlaz jednog neurona iz prethodnog sloja predstavlja ulaz svih neurona iz narednog sloja tj. postoji veza između svakog para neurona. Slojevi ovog tipa se najčešće mogu pronaći na kraju kao poslednji slojevi CNN modela. Zbog toga, oni se mogu posmatrati i kao izlazni slojevi. Kod njih, kada se javlja više od 2 klase, koristi se *softmax* aktivaciona funkcija. U suprotnom, kod binarne klasifikacije koristi se *sigmoidna* funkcija (logistička kriva) [9]. Karakteristika izlaznog sloja jeste da ima onoliko neurona koliko problem koji se rešava ima klasa. Izuzevši izlazni sloj modela, skup više *dense* slojeva se naziva skrivenim slojem. Uvod skrivenog sloja omogućava jednostavniji i pregledniji grafički prikaz strukture nekog CNN modela.

Grupa konvolucionih slojeva se odnosi na slojeve koji se koriste za ekstrakovanje karakterističnih osobina ulaznih podataka. Ovi slojevi su najbitniji u CNN modelu i koriste se u kombinaciji sa slojevima za objedinjavanje. Konvolucija predstavlja

korišćenje receptivnih polja (filtera) određenih dimenzija, sa željenim korakom, kako bi se izvršila detaljnija analiza ulaznih podataka tj. ekstrakovanje karakterističnih osobina. Takođe, ovim postupkom se redukuje količina podataka koja nastavlja ka narednom sloju CNN modela. Nakon konvolucionih slojeva primenjuju se slojevi za objedinjavanje. Ovi slojevi se koriste za dalje redukovanje količine podataka. Postoje razni načini za objedinjavanje, pri čemu je pristup maksimalnog objedinjavanja najkorišćeniji. On uglavnom koristi 2x2 filter koji prolazi dobijene podatke iz konvolucionih slojeva i vraća maksimalnu vrednost koju obuhvata filter. Tako da, kako filter 2x2 obuhvata ukupno 4 podatka po koraku, na njihovo mesto biće vraćen samo 1 podatak i to onaj koji ima najveću vrednost od njih 4. Drugi korišćeni načini obuhvataju pristup traženja prosečne vrednosti ili sume vrednosti podataka koje pokriva filter.

Manje bitne grupe su slojevi za regularizaciju i za preoblikovanje. Među slojevima za regularizaciju najpoznatiji je sloj ispuštanja (*dropout*). On poništava doprinos nekih slučajno izabranih neurona sledećem sloju. Obično se definiše verovatnoća p da će neuron biti isključen u epohi obuke, odnosno verovatnoća da neuron neće biti isključen iznosi $1 - p$. Slučajno isključivanje neurona se koristi kako bi se smanjila mogućnost pojave preterane obuke (*overfitting*) CNN modela. Preterana obuka dovodi do gubitka sposobnosti CNN modela da generalizuje podatke tj. da naučene koncepte primeni nad nepoznatim podacima. Najkorišćeniji sloj iz grupe za preoblikovanje je sloj za ravnanje. On se koristi najčešće posle sloja za objedinjavanje. Izvršava konvertovanje svih rezultujućih dvodimenzionalnih nizova u jedan linearni vektor. Ukoliko se na ulaz u sloj za ravnanje dovede matrica dimenzija 20x20 na izlazu će se dobiti vektor koji se sastoji od 400 elemenata. Ovakav vektor se dovodi kao ulaz u potpuno povezani sloj radi klasifikacije podatka.

3. CNN modeli

Usled brzog razvijanja ove oblasti kreiraju se novi CNN modeli koji se koriste. Takođe, pojavom novih koncepata modeli mogu brzo zastareti i biti izbačeni iz upotrebe. Zbog toga, poželjno je da modeli budu podložni konstantnim promenama i unapređenjima. Ovi modeli su korisni jer pružaju mogućnost obuke, validacije i testiranja na osnovu ulaznog skupa podataka za bilo koji problem. U ovom radu izabrana su tri modela, a to su ResNet50, VGG16 i VGG19, koji su etabrirani kao pouzdani i biće objašnjeni u nastavku.

3.1. ResNet

Rezidualna mreža (*Residual Network*, ResNet) predstavlja CNN model koji je razvijen u okviru kompanije *Microsoft* [11]. ResNet modeli mogu varirati u odnosu na broj rezidualnih blokova od kojih se sastoje. Rezidualni blok je skup više slojeva u modelu. Kao najkorišćenija varijacija ResNet-a, javlja se ResNet50 model koji se sastoji od ukupno 50 slojeva (48 konvolucionih slojeva, 1 sloj maksimalnog objedinjavanja i 1 sloj prosečnog objedinjavanja). Međutim, bitno je napomenuti da je ResNet152 prvi model ove vrste koji je dobio veliku pažnju. Razlog za to jeste pobeda na ILSVRC takmičenju 2015. godine gde je ostvario impresivnu grešku pri klasifikaciji slika koja je iznosila 3,6% [12].

Razumevanje jedinice građe ResNet modela (rezidualnog bloka) je prilično jednostavno. Neuronske mreže sa propagacijom signala unapred funkcionišu na način da izlaz iz svakog sloja predstavlja ulaz u naredni sloj. U mreži sa rezidualnim blokovima, izlaz iz svakog sloja se šalje kao ulaz u naredni sloj kao i u slojeve udaljene za najčešće 2 ili 3 sloja (*skip* konekcije). Ovakav pristup je omogućio rešavanje postojećih problema nestajućeg gradijenta i problema degradacije [13][14]. Problem nestajućeg gradijenta se javlja kod modela neuronskih mreža sa velikim brojem slojeva. U tom slučaju, postoji i veliki broj težina koje je potrebno podešavati tako da se gubici modela minimizuju. To se postiže kroz proces koji se zove propagacija unazad. Svaku težinu modela je potrebno ažurirati, ali zbog velikog broja težina, njihove vrednosti se menjaju u jako maloj meri ili se uopšte i ne menjaju. Problem degradacije se odnosi na opadanje preciznosti modela kao posledica uvođenja dodatnih slojeva. Intuitivno, dodavanje novih slojeva u model bi trebalo da doprinese boljem razumevanju ulaznih podataka, pa samim tim i većoj preciznosti. Međutim, dodatni slojevi dovode do većih grešaka tokom obuke, pa posledično i tokom validacije i testiranja modela [11]. Nakon uvođenja *skip* konekcija kod ResNet-a, oba problema su pokrivena i omogućeno je korišćenje većeg broja slojeva bez posledica po preciznost modela. Arhitektura ResNet50 modela je prikazana Slikom 2.

3.2. VGG

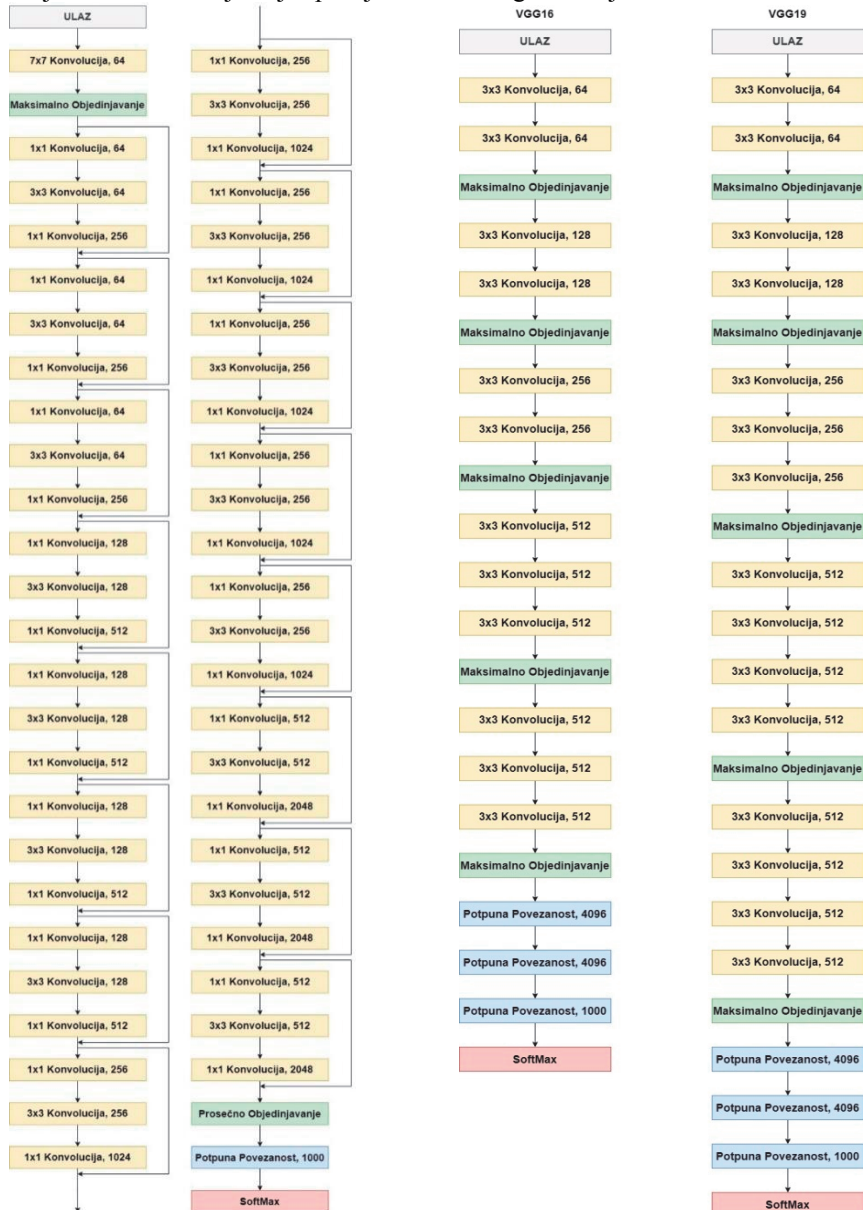
Nova grupa modela je razvijena od strane Vizuelne Geometrijske Grupe (*Visual Geometry Group*, VGG) sa Univerziteta u Oksfordu [15], po kojoj je i dobila ime. VGG modeli su predstavljeni na ILSVRC takmičenju 2014. godine, gde su završili na drugom mestu što je zavidan rezultat ako se uzme u obzir da su ostvarili grešku pri klasifikaciji od 7,3%, dok je na prvom mestu ta greška iznosila 6,7% [16]. Iako su zasnovani na *AlexNet* modelu [17], imaju nekoliko razlika koje ih izdvajaju od ostalih. Umesto da koriste velika receptivna polja kao što je slučaj kod *AlexNet*-a (11x11 sa korakom 4), oni koriste mala receptivna polja (3x3 sa korakom 1). Slaganjem više manjih polja dobijaju se bolji rezultati što je i najbitniji doprinos ovih modela [15]. Takođe, sastoje se od manje parametara u odnosu na *AlexNet* što rezultuje uštedom resursa pri obuci.

Glavna dva predstavnika su VGG16 i VGG19 modeli. Postoje dve varijacije VGG16 modela (C i D). Razlike između njih su minimalne, neka receptivna polja su veličine 1x1 i zbog toga je konačan broj parametara 134 i 138 miliona, respektivno. Brojevi 16 i 19 u imenima modela se odnose na broj ponderisanih slojeva. To znači da VGG19 sadrži tri ponderisana sloja više u odnosu na VGG16. U ponderisane slojeve spadaju konvolucionni slojevi i potpuno povezani slojevi. VGG16 se sastoji od 13 konvolucionih slojeva i 3 potpuno povezana sloja, a VGG19 od 16 konvolucionih slojeva i 3 potpuno povezana sloja. Arhitektura ova dva spomenuta CNN modela je prikazana na Slici 2. Moguće je napraviti i modele ove grupe koji se sastoje od još većeg broja slojeva sa težinama (VGG50, VGG60, itd.). Utvrđeno je da ovo nije dobro rešenje jer se u tim slučajevima, zbog jako velikog broja otežanih slojeva, javlja problem nestajućeg gradijenta koji je ResNet model pokrio.

4. Koncepti pripreme CNN modela i skupa slika

Bitna stavka u rešavanju problema klasifikacije jeste priprema jednog ili više CNN modela koji će se koristiti, ali naravno i priprema izabranog skupa slika koji

predstavlja ulaz u te modele. Kod pripreme CNN modela, fokus će biti na objašnjavanju ključnog koncepta koji se naziva prenosno učenje. Ovaj koncept omogućava bržu obuku CNN modela, što dalje pruža lakše eksperimentisanje sa modelom. Takođe, za pripremu izabranog skupa slika, potrebno je pregledati slike i razmotriti da li je taj skup adekvatan za korišćenje i da li je moguće izvršiti neko poboljšanje. Poboljšanja se postižu korišćenjem transformacija koje spadaju u okvire augmentacije slika.



Slika 2. Arhitektura ResNet50 modela (levo), VGG16 i VGG19 modela (desno)

4.1. Prenosno učenje

Koncept prenosnog učenja (*transfer learning*) je postao široko zastupljen u oblasti CNN-a. Glavna ideja koja stoji iza ovog koncepta jeste, kao i što ime kaže, da izvrši transfer (prenos) znanja nekog već obučenog CNN modela tj. da učitava model koji je već obučen pomoću ogromnih baza podataka (najčešće se radi o skupu slika). Uglavnom su poznati CNN modeli obučeni korišćenjem više od milion slika iz *ImageNet* baze podataka. Unapred obučeni model može da klasifikuje slike u 1000 različitih klasa. Kao rezultat toga, model u startu ima prednost jer je naučio razne karakteristike širokog spektra slika (formirao znanje). Sledeći korak se odnosi na korišćenje tog znanja kao osnovu za dalju obuku i rešavanje nekog drugog problema klasifikacije. Bitno je napomenuti da koncept prenosnog učenja znatno skraćuje vreme obuke CNN modela jer nije potrebno obučavati model od početka, već samo za željeni skup slika. Takođe, ovaj koncept se obično koristi za zadatke u kojima se javljaju jako mali (ograničeni) skupovi slika sa kojima nije moguće izvršiti obuku modela od početka.

Realizacija CNN modela i koncepta prenosnog učenja se može postići kroz razne programske jezike, od kojih je najčešće korišćen programski jezik *Python*. U tu svrhu se koriste specijalizovane biblioteke od kojih su najznačajnije *Keras* i *PyTorch*. U okviru *Keras* biblioteke na raspolaganju je 38 CNN modela, dok je kod *PyTorch* biblioteke moguće koristiti njih 33. Za sve ove CNN modele iz obe biblioteke moguće je postaviti inicijalne težine kroz tri opcije. Prva opcija jeste da se inicijalno polje za težine ostavi prazno što bi značilo da model kreće sa obukom od početka. Međutim, preostale dve opcije su znatno interesantnije. Druga opcija podrazumeva učitavanje težina koje su formirane prilikom obuke modela nad *ImageNet* bazom podataka. To znači da su svi CNN modeli koji su dostupni ovim bibliotekama prethodno obučeni i spremni za dalju upotrebu. Na kraju, treća opcija se odnosi na učitavanje proizvoljnih težina u CNN model tj. težina koje su formirane po završetku obuke nekog CNN modela nad nekom bazom podataka. Dakle, drugi i treći slučaj ukazuju na jednostavnu primenu koncepta prenosnog učenja između CNN modela u okviru ove dve biblioteke.

Postoje dve strategije sa kojima je moguće obučavati CNN modele i primeniti koncept prenosnog učenja, a to su: ekstrahovanje karakteristika i fino podešavanje [18]. Prva strategija se obično primenjuje kada se radi o malom skupu slika, dok se druga strategija koristi za srednje i velike skupove slika. Ekstrahovanje karakteristika se vrši kroz zamrzavanje slojeva obučenog CNN modela kako bi se osiguralo očuvanje karakteristika koje nose tokom buduće obuke, a zatim se dodaju novi slojevi preko zamrznutih. Na ovaj način, dodati slojevi će tokom obuke naučiti da pretvore postojeće znanje (karakteristike iz zamrznutih slojeva) u predikciju nad novim skupom slika. Fino podešavanje se služi konceptom zamrzavanja prvih nekoliko slojeva obučenog CNN modela, dok su ostali slojevi podložni obuci i izmenama. Nakon nekog vremena, slojevi se odmrzavaju i obuka se sprovodi do kraja. Obuka se tokom celog ovog procesa finog podešavanja sprovodi sa niskom stopom učenja.

4.2. Augmentacija slika

Jedna od glavnih poteškoća koja se može pojaviti pri obuci CNN modela jeste pronalaženje adekvatne baze podataka. Pod adekvatnom bazom podataka misli se najpre na to da je ona dovoljno velika i da su podaci ispravni. Veliki broj baza podataka je

dostupan na sajtu *Kaggle*, mada za neke ozbiljnije radove i istraživanja potrebno je kontaktirati kreatora tih baza podataka. U zavisnosti od problema koji se rešava, baze podataka za obuku se mogu sastojati od slika, teksta, zvuka i sl. Vezano za problem klasifikacije slika, mora se koristiti baza podataka sa skupom slika koje su podeljene prema klasama. Nad ovakvim skupom slika, ili bilo kojim drugim, može se primeniti augmentacija podataka radi njegovog proširenja i poboljšanja. Augmentacija predstavlja izvršavanje različitih transformacija nad podacima. Može se koristiti u svrhu proširivanja skupa podataka tj. od jedne slike se može dobiti više sličnih (augmentovanih) slika. Dalje, to se preslikava i na ceo skup slika, odnosno primenom augmentacije podataka dobija se veći skup. Korisno je primeniti ovakav pristup jer dobijanje većeg skupa slika značajno može doprineti u obuci CNN modela i njegovoj preciznosti. Potrebno je voditi računa na to koliko i koje transformacije se izvršavaju nad slikama kako slike ne bi postale neupotrebljive, pa čak i štetne, pri obuci CNN modela. Neke transformacije nad slikama koje se mogu primeniti se odnose na: uveličavanje, promenu osvetljenosti, promenu kontrasta, isecanje, rotiranje, horizontalno i vertikalno okretanje, itd. Slučajnost kod ovih transformacija se javlja tokom obuke CNN modela. Ukoliko se koristi više transformacija u modelu onda neka transformacija može biti primenjena nad slikom, a neke ne. Ukoliko je skup dovoljno velik i sadrži već uređene slike, nema potrebe koristiti transformacije u velikoj meri.

5. Zaključak

Potrebno je sagledati realne mogućnosti primene veštačke inteligencije u cilju dolaženja do novih saznanja, unapređivanja svakodnevnog života, prevazilaženja ljudskih ograničenja, itd. U skladu sa tim, ovaj rad se bavio primenom dubokog učenja koje pripada oblasti mašinskog učenja. Duboko učenje zasnovano na konvolucionim neuronskim mrežama je izvršilo revoluciju u pogledu analize digitalnih zapisa. Glavni cilj rada jeste da približi i objasni rad konvolucionih neuronskih mreža, ali i modela kroz koje se one primenjuju. Modeli koji su bili u fokusu i koji su predstavljeni su ResNet50, VGG16 i VGG19. Ovi modeli su dobra osnova za razumevanje funkcionisanja konvolucionih neuronskih mreža i za proučavanje drugih modela. Kao dodatak tome, potrebno je posvetiti pažnju i konceptima koji se koriste radi pripreme modela i baza podataka kao što su prenosno učenje i augmentacija podataka. Buduća istraživanja u ovoj oblasti se mogu odnositi na pronalazak novih aktivacionih funkcija, optimizaciju parametara modela, inovacije u arhitekturi modela, stvaranje novih baza podataka, unapređivanje koncepta pripreme modela i baza podataka, itd.

Literatura

- [1] M. Bakator, and D. Radosav, "Deep Learning and Medical Diagnosis: A Review of Literature", *Multimodal Technologies and Interaction*, 2018.
- [2] G. Hu, et. al., "When Face Recognition Meets With Deep Learning: An Evaluation of Convolutional Neural Networks for Face Recognition", *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops*, 2015.
- [3] A. Shrestha, and A. Mahmood, "Review of Deep Learning Algorithms and Architectures", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 53040-53065, 2019.

- [4] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, "Gradient-based learning applied to document recognition", *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 11, pp. 2278-2324, 1998.
- [5] MNIST database. [Online]. Available at: <https://yann.lecun.com/exdb/mnist/>
- [6] CIFAR database. [Online]. Available at: <https://www.cs.toronto.edu/~kriz/cifar.html>
- [7] ImageNet database. [Online]. Available at: <https://www.image-net.org/>
- [8] F. Agarap, "Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU)", 2018.
- [9] C. Nwankpa, W. Ijomah, A. Gachagan, and S. Marshall, "Activation Functions: Comparison of trends in Practice and Research for Deep Learning", 2018.
- [10] Keras Layers. [Online]. Available at: <https://keras.io/api/layers/>
- [11] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition", *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 770-778, 2016.
- [12] ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) 2015. [Online]. Available at: <https://image-net.org/challenges/LSVRC/2015/results>
- [13] A. Arohan, A. Koustav, and S. Abhishek, "A Review of Convolutional Neural Networks", *International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering*, 2020.
- [14] S. Genevieve, and M. Wasfy, "An Overview of Recent Convolutional Neural Network Algorithms for Image Recognition", *IEEE Xplore*, 2018.
- [15] K. Simonyan, and A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition", *International Conference on Learning Representations*, 2015.
- [16] ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) 2014. [Online]. Available at: <https://image-net.org/challenges/LSVRC/2014/results>
- [17] R. Kaur, and R. Kumar, "M. Gupta, Review on Transfer Learning for Convolutional Neural Network", *International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking*, pp. 922-926, 2021.
- [18] A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks", *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 1097-1105, 2012.

Abstract: Computer vision training is implemented using deep learning. Deep learning can be applied to solve a variety of classification problems. For this type of problems, the use of convolutional neural networks is proved to be the best solution. They have revolutionized the field of image recognition, providing high precision previously unattainable. Specifically, some of the relevant convolutional neural network models are ResNet50, VGG16, and VGG19. This paper explains the general structure and working principle of convolutional neural networks through their layers. Also, the architecture and performance of the mentioned models used in image classification tasks are presented. Concepts such as transfer learning and data augmentation are also explained.

Keywords: deep learning, convolutional neural networks, ResNet50, VGG16, VGG19.

DEEP LEARNING MODELS FOR IMAGE CLASSIFICATION USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Andreja Samčović, Nikola Matijašević, Marko Đogatović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.016>

TEHNIKE OBRADJE MULTIMEDIJE U REALNOM VREMENU KOD IoT SISTEMA

Ana Gavrovska¹, Aleksandar Luković²

¹Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, anaga777@etf.rs

²Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, a.lukovic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Razvojem IoT sistema dolazi do povećanja generisanja podataka. Pored tekstualnog tipa podataka javlja se prenos slike, zvuka i videa, tj. multimedijalnih podataka. Multimedijalni podaci utiču na povećanje opterećenja IoT sistema, memorijski kapacitet, složenost operacija, energetske resurse, brzinu izvršavanja naredbi, itd. Multimedia (pozitivno) utiče i pospešuje pojavu novih vrsta aplikacija. Tako se i javlja potreba za obradom multimedije u realnom vremenu. Cilj ovog rada je prikaz i opis tehnika obrade multimedije u realnom vremenu, sa ukazivanjem na trenutne izazove u različitim oblastima primene IoT tehnologija.*

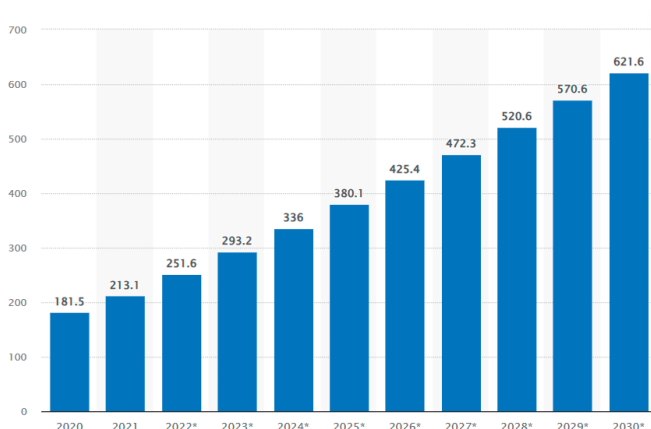
Ključne reči: *IoT, IoMT, MIoT, obrada multimedijalnih signala, obrada multimedije u realnom vremenu*

1. Uvod

Internet stvari tj. internet pametnih uređaja (IoT, *Internet of things*) predstavlja međusobno povezane fizičke i virtuelne uređaje („stvari“), koji komuniciraju i razmenjuju podatke sa okolinom. IoT je svojim širenjem našao primenu u raznim oblastima [1]. Neke od najznačajnijih i najzastupljenijih oblasti primene IoT sistema su:

- pametni gradovi – neki od elemenata pametnih gradova su pametni semafori, senzori za prikupljanje podataka, bežične senzorske mreže (WSN, *Wireless Sensor Networks*), pametni putevi sa pratećom infrastrukturom, pametne zgrade, itd;
- pametne energetske mreže – sistemi i senzori za prikupljanje podataka o potrošnji energije i energetskim resursima;
- pametna industrija – uređaji koji prate proizvodnju i vrše optimizaciju procesa upravljanja;
- digitalno zdravlje – pametni senzori za praćenje zdravlja i procesa oporavka pacijenta;
- multimedijalni sistemi – internet multimedijalnih uređaja (IoMT, *Internet of Multimedia Things*), pametni prenosivi uređaji (*wearables*), sistemi za nadzor, sistemi za upravljanje i SCADA sistemi (*Supervisory Control and Data Acquisition*), internet audio uređaja (IoAuT, *Internet of Audio Things*).

Na Slici 1 se može videti prikaz ukupnog godišnjeg (i očekivanog) prihoda širom sveta u domenu IoT tehnologije za period od 2020. do 2030. godine. Izvor podataka je sajt *Statista* (veb adresa: <https://www.statista.com/>). Na x osi grafika je vremenski period od pomenutih deset godina, a na y osi prihod od IoT u milijardama dolara.



Slika 1. Ukupan godišnji prihod širom sveta kod IoT-a od 2020. do 2030. godine [izvor: <https://www.statista.com/>]

Sa ove slike se može primetiti konstantni rast prihoda od IoT po godinama. Statistike u pogledu zastupljenosti IoT tehnologije kod pametnih gradova, industrije i pametnih energetske mreže gotovo da imaju isti tok funkcije, tj. beleži se stalni rast iz godine u godinu.

Imajući u vidu najnovije podatke sa sajta [2], trenutni broj povezanih IoT uređaja je približno 13,15 milijardi. U narednih sedam godina se očekuje broj od preko 25 milijardi povezanih uređaja. Broj IoT platformi u poslednje četiri godine je udvostručen i očekuje se dalji rast.

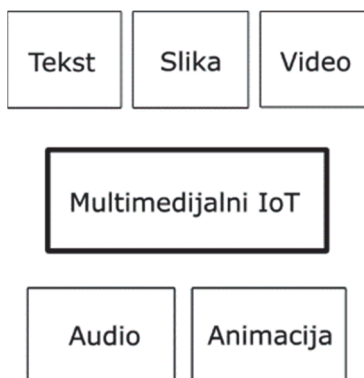
Glavni izazovi kod IoT-a koje navodi sajt [2] se odnose na: obradu senzorskih podataka, računarsku viziju, prepoznavanje govora, bezbednosni aspekt IoT-a, nedovoljno osposobljene kadrove za implementaciju bezbednosti IoT-a, zaštitu, prepoznavanje i pronalaženje osetljivih podataka. Takođe su zastupljeni problemi privatnosti, nedostatak efikasne kontrole pristupa, autentifikacije korisnika i (bezbednosnih) standarda. IoT će u budućnosti takođe biti koristan za proizvodnju, poljoprivredu i povezana vozila.

2. Multimedija kod IoT sistema

Multimedijalni signali se kod IoT sistema mogu kategorizovati i podeliti na: tekstualne podatke, sliku, video, audio i animaciju [3], kao što je ilustrovano na Slici 2.

Tekstualni podaci su najviše zastupljeni kod klasičnog tj. „skalarnog“ IoT-a (bez multimedije), gde dolazi do njihove razmene između senzora za praćenje određenih aktivnosti u životnoj sredini. Primeri su bežične senzorske mreže (WSN), podaci o temperaturi i vlažnosti vazduha, nivou zagađenja vazduha, režimu rada uređaja,

programske naredbe, itd. Ovakvi podaci ne zauzimaju mnogo memorijskog prostora. Slika kao vrsta multimedijalnog signala se kod IoT sistema pojavljuje kod kamera, pametne industrije, upravljačkih sistema i prenosivih uređaja.



Slika 2. Multimedijalni IoT

Video signali nastaju prenosom većeg broja slika u jedinici vremena. Zastupljeni su kod video kamera, kamera sa režimom snimanja od 360 stepeni, sistema za upravljanje i nadzor. Animacija je složeni multimedijalni signal, a može se pojaviti u svim sistemima gde se javlja i video signal. Kao sastavni i prateći deo multimedije javlja se i zvuk. Kod IoT sistema, zvuk dolazi sa signalima slike, videa i animacije. Posebna grana IoT-a koja proučava audio signale je internet audio stvari (IoAuT, *Internet of Audio Things*).

Ukoliko je cilj da IoT mreža prvenstveno prenosi multimedijalne signale, tada se umesto pojma IoT koristi pojam IoMT (*Internet of Multimedia Things*), tj. internet multimedijalnih stvari, sa naznakom „M“, koja se odnosi na multimediju. Pored pretežno tekstualnih podataka kod klasičnih IoT sistema, IoMT sistemi podržavaju prenos teksta, slike, videa, zvuka i njihovog međusobnog združivanja. Na taj način dolazi do proširenja standardnih vrsta podataka, a takođe i samih uređaja. Za realizaciju multimedijalnih signala je potreban odgovarajući IoT hardver sa naprednijim performansama i mogućnostima u pogledu izvršavanja operacija i složenijih proračuna, (mikro)procesorske ili snage mikrokontrolera, memorijskih kapaciteta, kao i osetljivosti na kašnjenje [4].

3. Obrada signala u realnom vremenu

Obrada signala predstavlja odabir ulaznog signala, izmene njegovih karakteristika nakon primene filtera, izmene talasnog oblika signala, pretvaranja iz jednog domena u drugi, kodovanje, dekodovanje, modulaciju, demodulaciju i ostale, a kao rezultat ima dobijanje izlaznog signala. Na raspolaganju su različita softverska rešenja/alati/paketi i hardverske komponente.

Obrada signala u realnom vremenu podrazumeva operacije koje donose promene ulaznog signala sa što manje kašnjenja, tj. što približnije trenutku njegovog izvršavanja. Na taj način se veoma brzo (trenutno) dobija i izlazni, obrađeni signal. Signali mogu biti različitog tipa, od tekstualnih i numeričkih - dobijenih sa senzora do združenih -

multimedijalnih. Akcenat ovog rada je na multimedijalnim signalima i primeni kod IoT sistema.

Naime, glavna tema ovog rada su tehnike obrade multimedijalnih signala u realnom vremenu kod (multimedijalnih) IoT sistema. Samim tim, glavne celine rada su:

- obrada multimedije u realnom vremenu tehnikama resursa ugrađene memorije (*in-memory*) i blokčejn tehnologija – ovde su multimedijalni signali posmatrani kao jedna celina (nisu razdvajani na tekst, sliku, video i animaciju, ali i interaktivnost);
- obrada slike u realnom vremenu metodama šifrovanja (enkripcije) uz haotične mape i
- obrada videa u realnom vremenu tehnikama adaptivne estimacije pokreta i detekcije anomalija.

Nakon tehnika obrade multimedije kod IoT sistema u ovom radu su navedene i specifične aplikacije.

Pri velikoj količini generisanih multimedijalnih podataka, nastaje pojam *multimedia big data*. Ova oblast je postala praktično samostalna. Pojavljuje se nova metoda obrade multimedijalnih signala u realnom vremenu korišćenjem resursa ugrađene memorije (*in-memory*). Akcenat je na brzom adresiranju i upotrebi keš (*cache*) memorije umesto čuvanja podataka na hard disku. Čuvanje podataka se sa hard diska premešta i obavlja u bazama podataka, a obrada se vrši uz pomoć interakcije centralne procesorske jedinice (CPU, *Central Processing Unit*) sa RAM (*Random Access Memory*) memorijom.

Rad [5] predlaže matematički model obrade multimedije u realnom vremenu koristeći obradu u memoriji, kao i i troslojni IoT model. Struktura IoT mreže se deli na tri sloja: senzorski, ivični i mrežni sloj. Pri analizi performansi modela izdvajaju se dve metrike: ukupno kašnjenje i stepen alokacije resursa. Rezultati su pokazali da pristup obrade multimedijalnih signala korišćenjem resursa ugrađene memorije daje povoljne rezultate u pogledu ukupnog kašnjenja, a takođe se postiže efikasna alokacija resursa.

Jedna od primena obrade slike u realnom vremenu kod IoT sistema je enkripcija slika. Enkripcija slika je složeni postupak i razlikuje se od enkripcije teksta, pre svega zbog obima podataka. Za postizanje uspešne enkripcije slike treba razviti nove standarde, algoritme i sisteme. Primer implementacije jednog takvog sistema je dat u radu [6].

U tom radu je detaljno izložen analitički postupak enkripcije (šifrovanja) slika u realnom vremenu uz pomoć metode haotičnih mapa. Haotične mape služe za poboljšanje generatora pseudo-slučajnih brojeva (PRNG, *Pseudorandom Number Generators*). U radu se razmatraju četiri tipa jednodimenzionalnih (1D) haotičnih mapa.

Korišćeni protokol za prenos enkriptovanih (šifrovanih) slika je MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). MQTT protokol služi za bezbedan prenos poruka kod IoT, klad (*cloud*, oblak) sistema i ugrađenih (*embedded*) uređaja. Koristi jednostavnu autentifikaciju unošenjem korisničkog imena i lozinke. Zahteva postojanje MQTT brokera, tj. centralizovanog servera za prikupljanje, prosleđivanje i prenos poruka. Obrada slike u realnom vremenu je danas popularna na primer kod prevoda teksta unutar same slike sa jednog jezika na drugi.

Poznato je da je video rezultat objedinjavanja više slika – frejmova/okvira (*frames*) u jedinici vremena. Tako se dolazi do pojma „broj frejmova u sekundi“, tj. (FPS, *frames per second*) kao jedne od osnovnih jedinica u oblasti video signala. Osobina ljudskog oka je da ne primeti pojedinačnu promenu slika pri promeni više od 25/30 slika u sekundi, pa je subjektivni osećaj takav da je video iz jednog dela.

Osnovna jedinica kod obrade video signala je video segment (*video chunk*). Jedan video segment sadrži jedan ili više video okvira, tj. frejmova. Obrada video signala

se može uopštiti na dve vrste. Prva vrsta obrade video signala uključuje predobradu (*preprocessing*) video segmenta, gde se uklanjaju određeni podaci u cilju kasnije brže obrade i prenosa ka udaljenom IoT serveru za obradu. Druga vrsta obrade video signala se odnosi na prenos originalnog video signala serveru za obradu.

Pri prenosu video signala kod IoT sistema u mreži nastaju velika opterećenja, pre svega zbog same kompleksnosti video signala u vidu količine podataka i memorijskog zauzeća. Primeri primene obrade signala u realnom vremenu su kod video kamera gde je potrebno prepoznavanje određenih objekata, proračun brzine kretanja vozila, detekcija krađe, detekcija požara, prevođenje teksta video zapisa sa jednog jezika na drugi, itd. Obrada videa u realnom vremenu može biti veoma kompleksna. Potrebno je obezbediti kvalitetnu obradu signala, a da se pritom ne naruše performanse kvaliteta servisa (QoS, *Quality of Service*). Trenutno najpopularniji standardi za video kodovanje su H.264/AVC, H.265/HEVC, VP9 i AV1. Najnoviji standardi u razvoju su H.266/VVC i MPEG-5 (EVC).

Kod kompresije video signala cilj je odvojiti korisni deo podataka (entropiju) od suvišnog (redundanse) i tako uštedeti na memorijskim resursima, a dobiti na smanjenju vremena obrade i kodovanja. Estimacija pokreta (ME, *Motion Estimation*) je jedna od metoda za uštedu memorijskih resursa i poboljšanje brzine kodovanja. Prepoznavanje objekata i estimacija pokreta video objekata su danas takođe popularne tehnike kod obrade video signala u realnom vremenu. Estimacija pokreta je proces određivanja kretanja objekta datog bloka u odnosu na njemu susedne blokove. Postoje neadaptivne i adaptivne metode estimacije pokreta. Neadaptivne metode se zasnivaju na fiksnom šablonu pretrage različitosti piksela. Kod adaptivnih metoda se vrši pretraga piksela u zavisnosti od stepena kretanja video objekta.

Rad [7] definiše algoritam estimacije pokreta zasnovan na blokovima koji su svesni konteksta (*context-aware*) u video sadržaju kao multimedijalnom elementu IoT sistema. Navedeni algoritam se svrstava u adaptivne metode estimacije pokreta, a stepen kretanja video objekta se određuje na osnovu razlike u pikselima referentnog i njemu susednog bloka. Algoritam definiše „prag“ (*threshold*) na osnovu koga se određuje vrsta kretanja objekta (sporo kretanje, srednja brzina kretanja, velika brzina kretanja). Neki od primera bi bili: saobraćaj – srednja brzina kretanja, košarkaška utakmica – srednja i velika brzina kretanja, kretanje kornjače – spora brzina kretanja.

Drugi primer obrade video signala u realnom vremenu je detekcija anomalija kod video signala u realnom vremenu. Detekcija anomalija je važan aspekt obrade signala u realnom vremenu, jer se na taj način otkrivaju pojave koje nisu uobičajene u određenom „uobičajenom“ stanju video zapisa. Rad [8] navodi sledeće metode detekcije anomalija: otkrivanje neovlašćenog pristupa digitalnom video zapisu, prostorno-vremensku strukturu video volumena, otkrivanje promena u realnom vremenu, detekciju brisanja frejmova, itd. Takođe se i predlaže novi pristup detekcije anomalija koristeći mreže dubokog učenja (DBM, *Deep Belief Networks*).

Ivično računarstvo (*edge computing*) je aktuelna mrežna tehnologija, gde mrežni čvorovi (različiti krajnji uređaji) učestvuju u obradi podataka. Na taj način se rasterećuje centralni mrežni server za obradu podataka i poboljšava rad mreže.

Kod ivičnih mrežnih (IoT) sistema postoji više čvorova i svaki čvor ima mogućnost obrade (video) signala. Cilj ovakvih mreža je, uopšteno, a i posebno kod multimedijalnih IoT sistema postizanje brže obrade video i multimedijalnih signala, rasterećivanjem centralnog servera, kao što je i prethodno rečeno. U slučaju video signala

osetljivog na kašnjenje i ostale karakteristike QoS, efikasno rešenje je podela video signala na manje video segmente i paralelna obrada video segmenata uz pomoć više čvorova.

Rad [9] izlaže ivičnu mrežnu platformu za obradu video signala kod multimedijalnih IoT sistema. Pomenuta platforma je zasnovana na „laganoj“ (*lightweight*) tehnologiji virtuelne predstave procesa i podataka (*virtualization*) i združenoj (kooperativnoj) obradi uz *Docker Swarm* mehanizam. U tom cilju se dolazi do tri vrste primene: nadgledanje u pametnim gradovima, satelitske mreže i internet vozila (IoV, *Internet-of-Vehicles*). Takođe je predstavljen i opšti model obrade video signala na ivičnom delu mreže.

Neke od specifičnih vrsta obrade video signala kod multimedijalnih IoT sistema su:

- obrada video striminga u realnom vremenu – vrlo osetljiv na kašnjenje, zahteva se stabilna internet konekcija;
- video igre – sadrže velike količine podataka koje treba preneti, vizuelne i zvučne efekte, a zahtevaju računarske komponente visokih performansi i
- obrada videa u oblasti telemedicine – telemedicina ili medicina na daljinu je tehnologija čije video signale za prenos odlikuje visoka osetljivost na kašnjenje, a zahteva se pouzdana komunikacija.

U Tabeli 1 se nalazi lista nekih IoMT aplikacija sa podacima o osetljivosti na mrežno kašnjenje.

Tabela 1. Lista nekih aplikacija i njihova osetljivost na kašnjenje

Aplikacija	Osetljivost na kašnjenje
Video striming u realnom vremenu	Visoka
Video igre	Visoka
Telemedicina	Visoka
Odloženo gledanje video zapisa	Niska
Podaci o temperaturi sa senzora	Srednja

Rad [10] objedinjuje specifične aplikacije kod multimedijalnih IoT sistema i daje predlog (radnog) okvira (*framework*) sistema za isporuku multimedijalnih IoMT servisa. Pristup sistemu imaju korisnici, a takođe i multimedijalni uređaji i senzori. Za pristup sistemu je neophodna autentifikacija. Sistem se zasniva na klaud platformi, a korisnici i uređaji nakon autentifikacije dobijaju pristup IoMT servisima uz odgovarajući IoMT softver. Sistem ima mogućnosti nadgledanja i kontrole procesa, upravljanja klaud prostorom, upravljanja resursima, distribucije multimedijalnih servisa, a podržava klaud (IaaS, PaaS, SaaS), maglu (*fog*-) i ivične mrežne servise. Imajući to u vidu, može se reći da su IoMT multimedijalni servisi raznovrsni.

4. Aktuelna rešenja za obradu multimedije u realnom vremenu kod IoT sistema

U Tabeli 2 je objedinjen prikaz aktuelnih rešenja za obradu multimedije u realnom vremenu kod IoT sistema. Navedeni su svi elementi literature korišćeni kao reference (ref.) za pisanje ovog rada.

Tabela 2. Aktuelna rešenja u oblasti obrade multimedije u realnom vremenu kod IoT sistema

Rad	Rešenje	Obrada u realnom vremenu	Ref.
<i>Real-Time Awareness Scheduling for Multimedia Big Data Oriented In-Memory Computing</i>	<ul style="list-style-type: none"> - troslojna IoT struktura - metoda planiranja zasnovana na informacijama zatvorene petlje za obradu signala u memoriji i rešenje za multimedijalne <i>big data</i> podatke u realnom vremenu 	✓	[5]
<i>Real-time RGB image encryption for IoT applications using enhanced sequences from chaotic maps</i>	<ul style="list-style-type: none"> - prikaz haotičnih mapa za enkripciju slika u realnom vremenu - algoritam za poboljšanje haotičnih sekvenci kod digitalne enkripcije slika - predložena šema za pouzdan prenos RGB slika u realnom vremenu - predložena šema simetričnog ključa šifrovanog protoka za IoT aplikacije korišćenjem poboljšanih haotičnih mapa - predloženi dekriptor protoka simetričnog ključa za IoT aplikacije koji koriste poboljšane haotične mape 	✓	[6]
<i>Context-aware block-based motion estimation algorithm for multimedia internet of things (IoT) platform</i>	<ul style="list-style-type: none"> - algoritam estimacije pokreta zasnovan na blokovima (BME, <i>Block-based Motion Estimation</i>) 	✓	[7]
<i>Anomaly Detection in Real-Time Videos using Match Subspace System and Deep Belief Networks</i>	<ul style="list-style-type: none"> - klasifikacija anomalija - tehnike detekcije anomalija - algoritam za detekciju anomalija 	✓	[8]
<i>Video Processing on the Edge for Multimedia IoT Systems</i>	<ul style="list-style-type: none"> - opšti model video obrade na ivičnom delu mreže - jednostavna ivična računarska platforma zasnovana na virtuelizaciji 	✓	[9]

<i>Innovation in Multimedia Using IoT Systems</i>	<ul style="list-style-type: none"> - blok šema IoMT platforme - objedinjena tabela sa trenutnim radnim okvirima za IoMT - prikaz multimedijalnih IoT aplikacija - predloženi radni okvir za distribuciju multimedijalnih servisa kod IoT - blok šema procesa transakcije čvora za pružanje IoT servisa 	✓	[10]
<i>A blockchain-based hybrid platform for multimedia data processing in IoT-Healthcare</i>	<ul style="list-style-type: none"> - šema aplikacija digitalnog zdravstva zasnovanih na blokčejn tehnologijama - predložena arhitektura okvira za obradu multimedije kod IoT aplikacija digitalnog zdravstva - dijagrami blokčejna i blokčejn transakcija 	✓	[11]
<i>A hybrid framework for multimedia data processing in IoT-healthcare using blockchain technology</i>	<ul style="list-style-type: none"> - blok šema primene blokčejn tehnologija kod IoT aplikacija - hibridni okvir za obradu multimedijalnih podataka kod IoT aplikacija za digitalno zdravstvo zasnovan na blokčejn tehnologijama 	✓	[12]
<i>The impact of the hybrid platform of internet of things and cloud computing on healthcare systems: opportunities, challenges and open problems</i>	<ul style="list-style-type: none"> - blok šema modela integracije klad i IoT tehnologija - nova paradigma <i>CloudIoT-Health</i> 	✓	[13]

5. Specifične aplikacije

U cilju očuvanja bezbednosti i privatnosti u realnom vremenu, kod IoT sistema se koriste blokčejn tehnologije. Kod aplikacija za digitalno zdravstvo razmenjuju se podaci o pacijentima, slike (sa ultrazvuka), nalazi o zdravstvenom stanju pacijenta u vidu tekstualnih podataka, slika i zvučnih datoteka. Neophodno je definisanje i razvoj mehanizama za bezbedan prenos i obradu podataka. Rad [11] predlaže hibridnu IoT platformu za digitalno zdravstvo zasnovanu na blokčejn tehnologijama.

Platformu bi koristilo osoblje zdravstvene (i više zdravstvenih) ustanova, kao i pacijenti. Pacijenti bi servisima IoT platforme pristupali preko grafičkog korisničkog interfejsa (GUI, *Graphical User Interface*) veb aplikacije. Veb aplikacija bi se sastojala od dva dela, korisničkog (*front-end*) i pozadinskog, tj. serverskog dela (*back-end*). Kao što je rečeno, preko korisničkog dela/interfejsa aplikacije, krajnji korisnik (pacijent ili zdravstveno osoblje) pristupa aplikaciji i servisima platforme. Serverski deo aplikacije se

sastoji od mreža, servera, baza podataka i svih sistema koji omogućavaju komunikaciju i rad korisničkog dela aplikacije, kao i blokčejn tehnologija. U serverskom delu blokčejn mreže se nalaze serveri za autentifikaciju i serveri za proveru transakcije (*miners*), koji transakcije dalje kopiraju u bazu podataka.

Blokčejn je veoma pogodna (ili skup više) tehnologija za postizanje bezbednosti i privatnosti, jer se beleži svaka promena transakcije i prenosa podataka u realnom vremenu. Rad [12] detaljno opisuje hibridni okvir za obradu multimedije kod digitalnog zdravstva zasnovanog na IoT i blokčejn tehnologijama.

Usporedni razvoj IoT i klad računarstva doveo je do međusobne integracije ovih oblasti. Nakon toga su nastale paradigme *CloudIoT* i *Cloud of Things*. Usled konstantne pojave novih aplikacija i servisa, nastale su i nove tehnologije, a neke od njih su *CloudIoT-Health* i *Healthcare Industrial IoT (HealthIIoT)* [13]. U ovoj oblasti, obrada signala u realnom vremenu je potrebna za: analizu medicinskih podataka prikupljenih sa senzora, nadgledanja stanja pacijenta, donošenje odluka, uvid u proces oporavka, itd.

6. Zaključak

Multimedija je složena vrsta signala i uključuje veliki broj podataka. To je upravo jedan od razloga za povećano mrežno, procesorsko i energetska opterećenje IoT sistema. Potrebno je odgovoriti na samu kompleksnost multimedijalnih signala definisanjem i projektovanjem novih uređaja i platformi za prenos multimedijalnih podataka i obradu u realnom vremenu, koji bi odgovorili na zahteve korisnika.

U ovom radu je dat pregled trenutno aktuelnih tehnika obrade multimedije u realnom vremenu u različitim oblastima primene IoT sistema. Spektar IoT aplikacija je veoma širok, a istraživanja i zahtevi mogu dovesti do definisanja sveobuhvatnog okvira IoT sistema uz implementaciju definisanih modela u zavisnosti od primene. Budući izazovi su okrenuti ka definisanju opštih i specifičnih okvira i modela za obradu multimedijalnih signala kod IoT u realnom vremenu i poboljšanju postojećih.

Literatura

- [1] S. Kaur, I. Singh, "A Survey Report on Internet of Things Applications", *International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCSST)*, vol. 4, iss. 2, ISSN: 2347-8578 pp. 330 - 335, March, 2016.
- [2] IoT statistika, dostupno na: <https://explodingtopics.com/blog/iot-stats#iot-industry-size> (Pristup: septembar, 2023.)
- [3] A. Samčović, *Multimedijalne komunikacije*, Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, Beograd, 2015.
- [4] Y. B. Zikria, M. K. Afzal, S. W. Kim, „Internet of Multimedia Things (IoMT): Opportunities, Challenges and Solutions“, *Sensors 2020*, vol. 20, April, 2020.
- [5] J. Xu, K. Ota, M. Dong, „Real-Time Awareness Scheduling for Multimedia Big Data Oriented In-Memory Computing“, *Internet of Things Journal*, vol. 20, no. 20, 2018.
- [6] D.A. Trujillo-Toledo, et al, „Real-time RGB image encryption for IoT applications using enhanced sequences from chaotic maps“, *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 153, 2021.
- [7] A. Saha, et al, „Context-aware block-based motion estimation algorithm for multimedia internet of things (IoT) platform, *Springer*, July, 2017.

- [8] D. R. Kishore, et al, „Anomaly Detection in Real-Time Videos using Match Subspace System and Deep Belief Networks“, *Multimedia Computing Systems and Virtual Reality*, pp. 151-168, CRC Press, 2022.
- [9] Y. Cao, et al, „Video Processing on the Edge for Multimedia IoT Systems“, *arXiv*, May, 2018.
- [10] A. A. Khan, et al, „Innovation in Multimedia Using IoT Systems“, *Multimedia Computing Systems and Virtual Reality*, pp. 171-183, CRC Press, 2022.
- [11] A. I. Taloba, et al, „A blockchain-based hybrid platform for multimedia data processing in IoT-Healthcare“, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 65, pp. 263-274, September, 2022.
- [12] G. Rathee, et al, „A hybrid framework for multimedia data processing in IoT-healthcare using blockchain technology“, *Multimedia Tools and Applications*, June, 2019.
- [13] A. Darwish, et al, „The impact of the hybrid platform of internet of things and cloud computing on healthcare systems: opportunities, challenges and open problems“, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, December, 2017.

Abstract: *The development of IoT systems leads to an increase in data generation. In addition to the text data type, the transmission of image, sound and video occurs, i.e. multimedia data. Multimedia data affects the increase in load on the IoT system, memory capacity, complexity of operations, energy resources, speed of execution of commands, etc. Multimedia (positively) influences and promotes the emergence of new types of applications. This is how the need for real-time multimedia processing occurs. The aim of this paper is to present and describe multimedia processing techniques in real time, with an indication of current challenges in various fields of IoT technology application.*

Keywords: *IoT, IoMT, MIoT, multimedia signal processing, real-time multimedia processing*

TECHNIQUES FOR REAL-TIME MULTIMEDIA PROCESSING IN IoT SYSTEMS

Ana Gavrovska, Aleksandar Luković

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.017>

PROJEKTOVANJE ELEKTRONSKE KOMUNIKACIONE MREŽE U FUNKCIJI BEZBEDNOSTI DRUMSKIH TUNELA

Dragan Đorđević, Miloš Končar, Periša Prokopijević, Aleksandar Dželetović
Saobraćajni Institut – CIP d.o.o,
dragan.djordjevic@sicip.co.rs, milos.koncar@sicip.co.rs,
perisa.prokopijevic@sicip.co.rs, aleksandar.dzeletovic@sicip.co.rs

Rezime: *Bezbednost korišćenja drumskih tunela predstavlja kritično pitanje jer tuneli mogu biti opasna mesta u slučaju saobraćajne nesreće ili požara. Tunelski telekomunikacioni sistemi (TK) kao što su alarmna (SOS) telefonija, automatska dojava požara, video nadzor opšte i specijalne namene, sistem razglasa, upravljanje promenjivom saobraćajnom signalizacijom i drugi, značajno doprinose smanjenju rizika u radu tunela. Okosnicu ovih raznorodnih TK sistema predstavlja tunelska elektronska komunikaciona mreža (EKM), koja mora da obezbedi brzu, pouzdanu i bezbednu komunikaciju između TK sistema unutar tunela i lokalnog tunelskog operativnog centra (TOC), kao i da omogući sistemsku integraciju u Inteligentne transportne sisteme (ITS). U ovom radu će biti analizirane osnovne karakteristike tunelske EKM bazirane na optičkom kablju kao medijumu, kroz primer autoputskog tunela projektovanog u Republici Srbiji.*

Ključne reči: *bezbednost tunela, tunelski telekomunikacioni sistemi, tunelska elektronska komunikaciona mreža, inteligentni transportni sistemi.*

1. Uvod

Ubrzanu izgradnju nove i rekonstrukciju postojeće drumske infrastrukture u Republici Srbiji poslednjih godina prati i parcijalna (fazna) implementacija inteligentnog transportnog sistema (ITS) sa ciljem da se obezbedi efikasnije, mobilnije i bezbednije odvijanje saobraćaja.

Neke od ključnih funkcionalnosti koje ITS-a treba da obezbedi su: prikupljanje i prenos podataka o saobraćaju, upravljanje i unapređenje bezbednosti saobraćaja, sistemaska interoperabilnost itd.

Komunikaciono-informacioni podsistemi u sklopu ITS-a koji se implementiraju su:

- Sistem za detekciju saobraćaja (automatski brojači saobraćaja);
- Sistem za akviziciju meteoroloških podataka;
- Sistem znakova sa izmenljivim sadržajem poruka;
- Sistem video nadzora opšte namene;

- Sistem video nadzora posebne namene (automatska detekcija incidenata, sistem za kontrolu kretanja vozila u suprotnom smeru, sistem za detekciju vangabaritnih vozila);
- Sistem nadzora i kontrole nad javnim osvetljenjem;
- Komunikaciona infrastruktura;
- Energetska infrastruktura;
- Tunelski sistemi.

Ovi podsistemi rade po različitim upravljačkim i telekomunikacionim tehnologijama, a osnovna funkcija im je obezbeđenje operativnog upravljanja i kontrola saobraćaja. Integracija ITS podsistema vrši se preko centralnog sistema za nadzor i upravljanje (CSNU).

U cilju integracije u jedinstvenu ITS platformu, oprema svakog podsistema mora da podržava komunikacione protokole i standarde. Mogući režimi (mod-ovi) rada ITS-a su: autonomni, poluautonomni, ručni i servisni [1]. Hijerarhija upravljanja ITS organizovana je na sledeći način:

- *Prvi nivo* upravljanja je lokalno automatski u predefinisanoj režimu rada.
- *Drugi nivo* je upravljanje od strane operatera preko grafičkog korisničkog interfejsa (SCADA) sa lokalne upravljačke stanice (locirane u tunelskom operativnom centru – TOC)
- *Treći nivo* upravljanja je daljinsko upravljanje iz regionalnih centara u kojima je integrisano više lokalnih upravljačkih stanica.
- *Četvrti nivo* je Republički centar za upravljanje saobraćajem koji integriše sve Regionalne centre.[1]

Kao glavni komunikacioni medijum ITS-a duž trase državnih puteva IA reda polaže se monomodni optički kabl (144 vlakna) sa potrebnom kablovskom kanalizacijom i privodima ka planiranim elementima ITS-a.

Tuneli, kao delovi drumske infrastrukture, spadaju u rizična mesta na kojima postoji mogućnost nastanka saobraćajne nesreće ili požara. U tom smislu, pri građenju tunela primenjuje se niz sigurnosnih, tehnoloških i organizacionih rešenja u cilju smanjenja rizika odnosno povećanja bezbednosti u tunelu (kao što su npr. evakuacioni prolazi, sistem alarmne (SOS) telefonije, sistem ventilacije, sistem i/ili oprema za gašenje požara, adaptibilno osvetljenje, označavanje, upravljanje saobraćajem i drugo. Takođe, tunelski telekomunikacioni sistemi (TK) značajno doprinose smanjenju rizika u radu tunela. Nivo opremanja tunela TK sistemima određuje se procenom rizika i u skladu sa smernicama definisanim u važećim preporukama RABT (*Regulations for the equipment and operation of road tunnels*).

2. Elektronska Komunikaciona Mreža (EKM) u drumskom tunelu

Okosnicu tunelskih TK sistema predstavlja tunelska elektronska komunikaciona mreža (EKM), koja mora da obezbedi brzu, pouzdanu i bezbednu komunikaciju između sistema unutar tunela i lokalnog tunelskog operativnog centra (TOC). Takođe, treba da omogući i sistemsku integraciju u ITS. Tip arhitekture EKM koji se u praksi primenjuje u drumskim tunelima je *Ethernet TCP/IP*. S tim u vezi, sve komponente sistema povezane na tunelsku EKM moraju da budu *Ethernet TCP/IP* kompatibilne. Okosnica *Ethernet* mreže formira se upotrebom optičkih vlakana (*EoF-Ethernet Over Fibers*).

Prednosti *EoF* tehnologije su:

- velika brzina prenosa podataka (>40Gb/s),
- veliko premostivo rastojanje (>100km),

- redundantnost - omogućava prstenasto formiranje mreže i tako obezbeđuje redundansu, što je od suštinskog značaja za primenu u rizičnim objektima kao što su putni tuneli,
- otpornost na elektromagnetne uticaje (EMI/RFI): upotreba optičkih vlakana eliminiše uticaje koji su često prisutni u tradicionalnim *Ethernet* mrežama zasnovanim na bakru, obezbeđujući pouzdan prenos podataka,
- otvoreni standardni protokoli: ovi protokoli omogućavaju laku integraciju sa drugim podsistemima i sistemima u tunelu (npr.: TLS, Modbus, Modbus/TCP, IEC 61508 – SIL3, IEC 62443, IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-104, IEC 61850, OPC, SSI, SNMP, Ethernet IP, DATEX II, SIP, VoIP i dr.).

Kao što je navedeno, EKM tunela se formira u topologiju prstena što je najpovoljnije sa stanovišta redundanse. Mrežni svičevi se biraju sa dva ugrađena porta za monomodna optička vlakna i time omogućavaju redundantno umrežavanje protokolom RSTP (*Rapid Spanning Tree*). Pošto su svičevi sa dve strane povezani na vlakna optičkog prstena, prekid optičke veze u jednom pravcu neće uticati na rad sviča, pošto će se sistem ponovo konfigurisati na alternativni prenosni put. Ako je jedan od svičeva neispravan, to neće uticati na funkcionisanje drugih svičeva u mrežnoj petlji. Primer topologije prikazan je na slici 1. Prilikom projektovanja treba imati u vidu karakteristike savremenih računarskih (*Ethernet*) mreža:

- pristupna brzina klijentskih uređaja 1Gb/s,
- komunikacija između mrežnih čvorišta 10Gb/s,
- brzina komunikacije čvorišta sa serverima 10-40Gb/s,
- mogućnosti segmentiranja i upravljanja saobraćajem po više kriterijuma,
- mogućnost daljinskog nadziranja i konfigurisanja mrežne opreme,
- mogućnost postojanja rezervnih putanja između čvorišta sa automatskim odabirom najbolje putanje,
- mogućnost povezivanja lokalne mreže sa lokalnom mrežom na udaljenoj lokaciji (VPN),
- mogućnost jednostavnog proširivanja kapaciteta mreže.

Prilikom projektovanja EKM mora se uzeti u obzir i postojeće stanje IT sistema, trenutne realne potrebe i procena rasta IT sistema kako po pitanju servisa, tako i po broju korisnika. Na osnovu ovih činjenica moguće je odrediti adekvatnu tehnologiju i opremu.

Bitne stavke prilikom projektovanja EKM su:

- procena broja priključnih mesta,
- procena optimalnih trasa kablova od čvorišta do priključnih mesta uzimajući u obzir postojanje potencijalnih smetnji na trasi,
- optimalna procena tipa pasivne opreme koja će obezbediti očekivane performanse,
- procena potrebnih brzina između čvorišta i tehnologija za njihovu realizaciju,
- redundantne veze između čvorišta,
- bezbedan prolaz između mreža kao i između lokalne računarske mreže i servera na internetu.

3. Projekat EKM tunela

U narednom tekstu prikazaćemo konkretan primer realizacije elektronske komunikacione mreže kroz pojednostavljen projekat za izvođenje TK sistema tunela „Lipak“ [3]. Kroz tehnički opis projekta ćemo dati osnovne informacije o položaju i arhitekturi tunela i

predviđenim tunelskim TK sistemima. Opisat ćemo konstrukciju EKM kroz izbor aktivne i pasivne opreme i izbor spojnih puteva. Pojednostavljeni grafički prikaz topologije, rasporeda i povezivanja opreme EKM dat je na slici 1.

Tunel „Lipak“ nalazi se na transevropskom koridoru (Koridor 10) autoputa E-75 tj. na južnoj obilaznici Beograda, na stacionaži km 578+505 - km 579+170. Objekat se sastoji od dve tunelske cevi sa po dve vozne trake i jednom zaustavnom trakom:

- Desna tunelska cev: L= 665,00m
- Leva tunelska cev: L= 600,00m

Tunelske cevi su međusobno povezane prolazima. Postoje dva prolaza isključivo za pešake. Duž tunelskih cevi predviđene su tunelske niše i to: sa desne strane tunelske cevi u smeru vožnje niše za uzbunjivanje (SOS), dok se hidrantske niše nalaze sa leve strane tunelskih cevi. Elektroenergetske (EN) se nalaze na istoj strani kao i SOS niše. U svakoj tunelskoj cevi predviđeno je po pet SOS niša (sa telekomunikacionom, energetskom i opremom automatike), po dve EN niše (za energetsku opremu i automatiku) i po pet hidrantskih niša (sa hidrantom, koturom sa crevom i mlaznicom).

U sklopu svake SOS niše predviđen je prostor za smeštaj prenosnih aparata za gašenje požara, SOS telefona, ručnog i automatskog javljača požara. Ovaj prostor je sa posebnim ulaznim vratima i omogućava nezavisan pristup iz tunelske cevi. Na ulazima u prolaze za pešake između tunelskih cevi predviđena su vrata sa mehanizmom koji ih uvek drži u zatvorenom ali odbravljenom stanju.

U tunelskim cevima, sa obe strane ispod pešačkih staza (prinudni putevi za evakuaciju), predviđeni su kablovski kanali u kojima se nalaze kablovski nosači/regali, pokriven betonskim pločama i presvučen tankim slojem asfalta. Ovi regali su namenjeni za polaganje energetskih i telekomunikacionih kablova, koji služe za napajanje i upravljanje tehničkim sistemima u tunelu. Predviđeno je da se poprečne veze kablovskih kanala u tunelskim cevima realizuju su PVC cevima postavljenim ispod kolovoza i kablovskom kanalizacijom ispred ulazno-izlaznih portala.

Na izlazu leve tunelske cevi, sa desne strane u smeru vožnje, nalazi se objekat pogonske stanice (PS) „Lipak“ u kojem je smeštena transformatorska stanica, UPS sistem, dizel agregat, prostorija za smeštaj opreme telekomunikacionih sistema kao i prostorija za lokalni nadzor. Tunelski operativni centar za nadzor deonice (pa i za tunel „Lipak“) predviđen je na lokaciji Petlovo brdo u sklopu postojećeg objekta JP „Putevi Srbije“.

Tunel je, s obzirom na specifičnost odvijanja saobraćaja, opremljen sa sistemima i instalacijama koje su neophodne za visok nivo bezbednosti. Najveći broj predviđenih sistema i instalacija se tretiraju kao sistemi čija se funkcionalnost mora obezbediti, kako u redovnim okolnostima, tako i u svim vanrednim situacijama od kojih je pojava požara najkritičnija.

Projektom su obuhvaćeni sledeći telekomunikacioni i signalni sistemi:

- SOS interfonski sistem (alarmna telefonija),
- Sistem razglasa (*VA-voice alarm system*),
- Stabilni sistem za dojavu požara,
- Video nadzor opšte i posebne namene (*AID- Automatic Incident Detection*)
- Sistem detekcije provale,
- Sistem kontrole pristupa,
- Sistem za akviziciju meteoroloških podataka,
- Sistem kontrole kvaliteta, brzine i smera strujanja vazduha,
- EKM - Elektronska Komunikaciona Mreža – sistem kablova i aktivne opreme (predmet ovog rada) kao komunikaciona okosnica svih tunelskih TK sistema.

Elektronska komunikaciona mreža predstavlja osnovu za pouzdan rad, integraciju i interakciju svih sigurnosnih, upravljačkih i nadzornih sistema na nivou tunela. U tom smislu komunikaciona mreža tunela će biti realizovana na način da svi elementi navedenih sistema u svakom trenutku budu dostupni informacionom sistemu kako na lokalnom nivou (autonomni radni mod) tako i na nivou tunelskog operativnog centra (daljinski nadzor i upravljanje).

Komunikaciona mreža sastoji se od dve paralelne mrežne infrastrukture koje formiraju mrežni elementi (Ethernet svičevi) raspoređeni u topologiju prstena, a sama komunikacija između svih elementa je bazirana na TCP/IP prenosu. Prva mreža integriše (na nivou prenosa podataka) sve sisteme koji omogućavaju autonomni radni mod tunela i kratko će se zvati mreža "Upravljanje". Druga mreža služi samo za prenos podataka (stream-ova) sistema video nadzora i kratko će se zvati mreža "Video". Video saobraćaj zauzima znatno više resursa propusnog opsega u poređenju sa drugim telekomunikacionim sistemima pa se zbog toga odvaja u posebnu mrežu, kako video servisi ne bi zagušili ostale, vitalnije sisteme bitne za autonomni radni mod tunela. Ethernet svičevi će biti smešteni u ormanima automatskog upravljanja - OA u svim SOS nišama, prostoriji za smeštaj komunikacione opreme u pogonskoj stanici tunela (TOC) i komandno-operativnom centru (KOC). Propusni opseg obe mreže na lokalnom nivou tunela je 1Gb/s. Povezivanje i interakcija ove dve mreže za potrebe Centralnog sistema za nadzor i upravljanje (CSNU) vrši se u pogonskoj stanici (TOC) putem posredničkih svičeva sa Layer 3 funkcionalnošću.

U fizičkom smislu osnovna komunikaciona infrastruktura realizovana je optičkim kablovima sa 12 monomodnih optičkih vlakana 9/125μm. Predviđena je struktura u obliku optičkog prstena kojom je obezbeđena redundantna veza. U slučaju prekida optičkog kabla svi sistemi će i dalje biti u funkciji. Monomodni optički kabl se od pogonske stanice polaže u kablovskoj kanalizaciji do kanala za vođenje instalacija u levoj tunelskoj cevi. Zatim se kroz kablovski kanal u levoj cevi kabl vodi do svake SOS niše, gde se završava na optičkom razdelniku odgovarajućeg kapaciteta. Na kraju leve cevi optički kabl kroz poprečnu vezu ispred tunela prelazi u kablovski kanal u desnoj tunelskoj cevi i nastavlja dalje do svake SOS niše u desnoj cevi. Iz desne tunelske cevi kabl se kroz kablovsku kanalizaciju vraća nazad do pogonske stanice (slika 1). Za završavanje kabla u objektu pogonske stanice predviđeni su optički razdelnički (patch) paneli sa 24 SC konektora. Oprema je predviđena za montažu na 19" ram u SKS ormanu (reku). Za završavanje kabla u SOS nišama predviđeni su optički patch paneli sa 12 SC duplex konektora. Oprema je predviđena za montažu na DIN šinu unutar ormara automatskog upravljanja – OA u sklopu SOS niše. Planirano je da se 12 dolaznih i 12 odlaznih vlakana završava na optičkom panelu.

Plan korišćenja vlakana:

- vlakna 1 i 2 – povezivanje mrežne opreme na koju se spajaju: svi TK sistemi osim video nadzora, saobraćajno informacioni sistem (obe tunelske cevi),
- vlakna 3 i 4 – povezivanje mrežne opreme na koju se spaja video nadzor (obe cevi),
- vlakna 5 i 6 – rezerva u svakoj SOS niši (obe tunelske cevi),
- vlakna 7 i 8 – sistem razglasa (veza kontrolera i pojačavača u tunelu, obe cevi),
- vlakna 9 i 10 – rezerva,
- vlakna 11 i 12 – rezerva.

U glavnom tunelskom telekomunikacionom čvorištu (lociranom u sklopu pogonske stanice gde je formiran tunelski operativni centar TOC) instaliraju se četiri centralna sviča (dva za mrežu upravljanja i dva za video mrežu) sledećih karakteristika:

- Upravljivi svič, montaža u 19" rek orman,
- Portovi: (24) 10/100/1000Base-T + (4) 100/1000Base-X SFP + (4) 1G/10GBase-X SFP,
- L2/L3 funkcionalnost,
- IPv4/IPv6 protokoli,
- Standardi iz grupe IEEE 802.3--,
- Podrška za: IGMP multicast; SNMP i Web menadžment mreže; MSTP, RSTP i STP Spanning Tree protokole; VLAN; Port Trunking; Routing protokole (OSPF); DHCP i Autentifikaciju.

U svakoj SOS niši, instaliraju se dva sviča (jedan za mrežu upravljanja i jedan za video mrežu), sledećih karakteristika:

- Upravljivi svič, DIN montaža,
- Portovi: (7) 10/100Base-TX + (3) 100/1000Base-X SFP/RJ-45 Combo,
- L2 funkcionalnost,
- IPv4/IPv6 protokoli,
- Standardi: iz grupe IEEE 802.3—,
- Podrška za: IGMP multicast; SNMP i Web menadžment mreže; MSTP, RSTP i STP Spanning Tree protokole; VLAN; Port Trunking; Routing protokole (OSPF); DHCP i Autentifikaciju.

Procena potrebne brzine protoka

Za proračun procene potrebne brzine protoka EKM korišćena je specijalizovana softverska aplikacija za tu svrhu, a sistem video nadzora uzet je kao referentni jer je najzahtevniji u tom smislu.

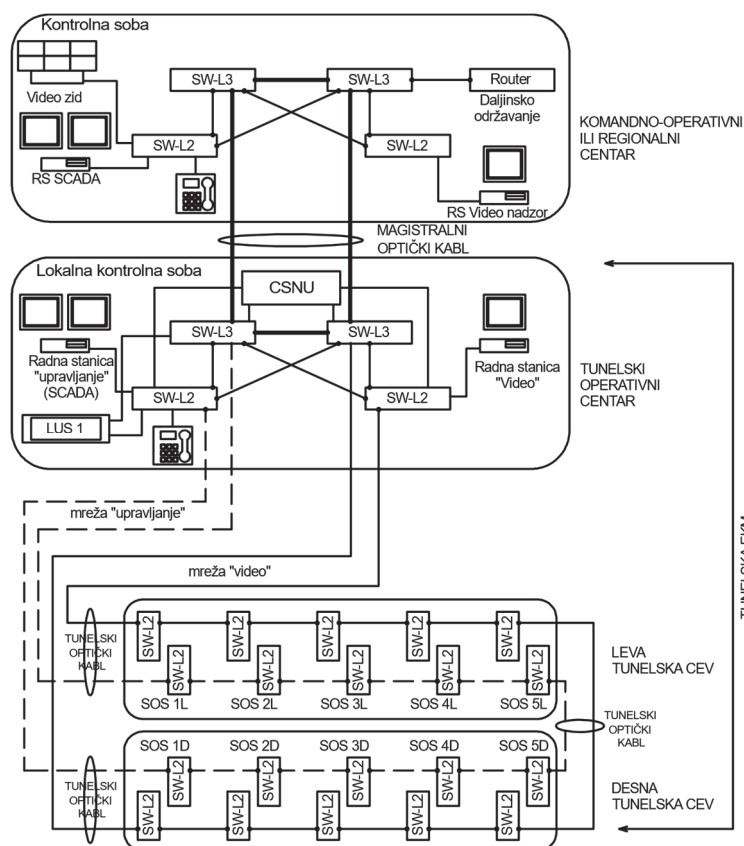
<p>Očekivana veličina strim-a po fiksnoj AID kameri:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Video nadzor: 6,5Mb/s, - Video zid: 2,6Mb/s, - AID: 2,6Mb/s, - Ukupno: 11,7 Mb/s, <p>Ukupno 22 AID kamere: 257,4 Mb/s.</p>	<p>Očekivana veličina strim-a po PTZ kameri:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Video nadzor: 6,5Mb/s, - Video zid: 2,6Mb/s, - Ukupno: 9,1 Mb/s, <p>Ukupno 10 PTZ kamera za nadzor: 91 Mb/s</p>
<p>Očekivana veličina strim-a po fiksnoj kameri:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Video nadzor: 6,5Mb/s, - Video zid: 2,6Mb/s, - Ukupno: 9,1 Mb/s, <p>Ukupno 5 fiksnih kamera za nadzor: 45,5 Mb/s.</p>	<p>Ukupno: 257,4 + 45,5 + 91 = 393,9 Mb/s = 0,3939 Gb/s.</p>

Dakle, projektovani kapacitet video mreže od 1 Gb/s je dovoljan za nesmetan rad video sistema [3].

4. Topologija EKM, integracija tunelskih sistema

U glavnom telekomunikacionom čvorištu tunela - TOC-u, pored operatorskih stanica tunelskih sistema, nalaze se CSNU i lokalna upravljačka stanica - LUS. CSNU objedinjuje: server SOS interfonskog sistema, video menadžment server, video server za automatsku detekciju incidenata i komponente za arhiviranje podataka sistema; LUS (centralni kontroler automatskog upravljanja) integriše signale svih tunelskih sistema na jednom mestu i omogućava njihovu međusobnu interakciju. Preko LUS-a se ostvaruje lokalno ručno i lokalno automatsko upravljanje tunelom, a takođe i prosleđuju informacije ka CSNU. Elementi svih sistema povezuju se na centralni kontroler kao krajnji IP bazirani uređaj putem *Ethernet* svičeva u jedinstvenu mrežnu infrastrukturu. Većina elemenata je IP bazirana pa se direktno povezuje na *Ethernet* svičeve, dok se deo elemenata i signala povezuje na analogne i digitalne ulaze/izlaze posredničkih distributivnih kontrolera/modula koji takođe imaju IP baziranu vezu sa *Ethernet* svičevima [4].

U okviru komandno operativnog centra (KOC) „Petlovo brdo“ za nadzor i upravljanje više tunela, pored operatorskih stanica tunelskih sistema predviđen je i *Router/Firewall* uređaj za pristup tunelskim sistemima sa udaljene lokacije [4].



Slika 1. Topologija i povezivanje opreme tunelske komunikacione mreže

5. Zaključak

Sistemi za praćenje, detekciju i upravljanje spadaju u ključne faktore efikasnog upravljanja saobraćajem i bezbednosti putnika i osoblja u drumskim tunelima. Stoga je kvalitet komunikacione mreže kao okosnice ovih sistema veoma značajan za njihov efikasan i pouzdan rad. U tom smislu potrebno je projektovati i implementirati savremena, fleksibilna i ekonomična rešenja EKM. *Ethernet* TCP/IP mrežna arhitektura preko optičkih vlakana nudi velike brzine prenosa podataka, otpornost na elektromagnetne uticaje i otvorene standardne protokole. Time se obezbeđuje pouzdano i fleksibilno povezivanje tunelskih sistema, ostvaruje mogućnost proširenja novim servisima i omogućava relativno jednostavna integracija u hijerarhiju ITS-a.

Literatura

- [1] "Koncept razvoja inteligentnih transportnih sistema na mreži državnih puteva Republike Srbije -predlog-", JP "Putevi Srbije" Beograd 2020.,
- [2] RABT 2006. Regulations For The Equipment and Operation of Road Tunnels,
- [3] 5 /1. Projekat telekomunikacionih sistema tunela „Lipak“-Saobraćajni Institut CIP – Beograd 2020.
- [4] 4 /5. Projekat automatskog upravljanja i centralnog sistema za nadzor i upravljanje tunela „Lipak“-Saobraćajni Institut CIP – Beograd 2020.

Summary: *The safety of using road tunnels is a critical issue because tunnels can be dangerous places in the event of a traffic accident or fire. Tunnel telecommunication systems (TC) such as alarm telephony, automatic fire alarm, video surveillance for general and special purposes, public address system, management of variable traffic signals and others, significantly contribute to the reduction of risks in the operation of tunnels. The backbone of these diverse TK systems is the tunnel electronic communication network (ECM), which must provide fast, reliable, and secure communication between the TK system inside the tunnel and the local tunnel operation center (TOC), as well as enable system integration in ITS. This paper will analyze the basic characteristics of tunnel EKM based on optical cable as a medium, through the example of a highway tunnel designed in the Republic of Serbia.*

Keywords: *tunnel safety, tunnel telecommunication systems, tunnel electronic communication network, intelligent transport systems.*

**DESIGNING AN ELECTRONIC COMMUNICATION
NETWORK IN THE SERVICE OF ROAD TUNNELS SAFETY**
Dragan Đorđević, Miloš Končar, Periša Prokopijević, Aleksandar Dželetović

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.018>

PROJEKTOVANJE STRUKTURE POSLOVNOG INFORMACIONOG SISTEMA INFRASTRUKTURE ŽELEZNICE SRBIJE NA DEONICI (BEOGRAD CENTAR) – STARA PAZOVA – NOVI SAD

Jelena Radović, Ana Ilić
Saobraćajni institut CIP d.o.o,
jelena.radovic@sicip.co.rs, ana.ilic@sicip.co.rs

Rezime: *Pruga (Beograd Centar) – Stara Pazova – Novi Sad – Subotica – državna granica (Kelebija) je magistralna pruga železnica Srbije. Pruga je značajna u nacionalnom saobraćaju jer povezuje velike železničke čvorove – Beograd, Novi Sad i Suboticu kao i veliki broj drugih naselja i industrijskih zona. Internacionalni značaj pruge se ogleda u tome što povezuje delove centralne, zapadne i istočne Evrope sa Grčkom i Bliskim istokom. U okviru modernizacije, rekonstrukcije i izgradnje deonice (Beograd Centar) – Stara Pazova – (Novi Sad) projektovana je dvokolosečna pruga za mešoviti (putnički i teretni) saobraćaj, sa brzinom do 200km/h. Projektovani su, između ostalog, i različiti sistemi za informisanje putnika, sistemi tehničke zaštite i železnički telekomunikacioni sistemi. U ovom radu je prikazano principijelno projektovano rešenje strukture poslovnog informacionog sistema Infrastrukture Železnice Srbije za prenos servisa koji nisu od kritičnog značaja za odvijanje saobraćaja. Projektovana je IP/MPLS mreža organizovana u slojevima koja se oslanja na projektovani prsten optičkih kablova.*

Ključne reči: *železnički telekomunikacioni sistemi, poslovni informacioni sistemi, IP/MPLS mreža*

1. Uvod

Infrastruktura Železnice Srbije (IŽS) je kao korisnik i investitor planirala modernizaciju, rekonstrukciju i izgradnju magistralne pruge 105 železnica Srbije (Beograd Centar) – Stara Pazova – Novi Sad – Subotica – državna granica (Kelebija) u nekoliko faza. Prva faza je obuhvatala radove na deonici (Beograd Centar) – Stara Pazova (izlaz), druga na deonici Stara Pazova (izlaz) – Novi Sad (ulaz), a treća na deonici Novi Sad – Subotica – državna granica (Kelebija). U toku izvođenja radova na modernizaciji dodata je i četvrta faza koja obuhvata deo stanice Beograd Centar. Dinamika projektovanja i izvođenja rezultirala je zahtevom IŽS da se nakon izvršenih radova projektovanih kroz prvu, drugu i četvrtu fazu formira prva deonica (Beograd Centar) – Stara Pazova – (Novi

Sad) i na njoj uspostavi saobraćaj pre završetka rekonstrukcije druge deonice Novi Sad – Subotica – državna granica (Kelebija).

Izrada tehničke dokumentacije za prvu deonicu je započela 2015. godine. Tehničkom dokumentacijom je sprovedena jedna od prvih sveobuhvatnih modernizacija poslovnog informacionog sistema i servisa koji ga koriste na deonici ove dužine nakon dužeg vremena. Modernizovana deonica je puštena u rad 2022. godine.

Postojeća pruga je bila namenjena za mešoviti (putnički i teretni) saobraćaj, elektrificirana i većim delom jednokolosečna (na oko 150km) sa projektovanom brzinom od 120km/h. Nakon rekonstrukcije, pruga je iste namene, elektrificirana, ali skraćena na 182km i dvokolosečna sa projektovanom brzinom do 200km/h na najvećem delu trase.

2. Postojeće stanje pojedinih telekomunikacionih sistema i instalacija IŽS pre modernizacije i osnovni zahtevi za njihovu modernizaciju

Na mreži pruga IŽS zastupljeni su različiti telekomunikacioni sistemi. Postojeća pruga je, između ostalog, bila opremljena sistemima za potrebe osoblja (analogni telefonski sistem za nekritičnu komunikaciju - železnička automatska telefonska (ŽAT) mreža i satni sistem baziran na sinhronizaciji minutnim impulsom) i poslovnim informacionim sistemom IŽS.

Generalno postojeći poslovni informacioni sistem IŽS je zasnovan na komunikacionoj i serverskoj opremi i pokriva celokupnu teritoriju Srbije. Jedno od centralnih čvorišta je poslovna zgrada locirana u Nemanjinoj ulici. Na predmetnoj deonici sistem je bio u funkciji i zadovoljavao je potrebe servisa koji su ga koristili, pri čemu je pojedina oprema u nekim službenim mestima bila starije generacije.

Postojeći pružni kablovi na prugama IŽS (trenutno većinom bakarni) su generalno položeni paralelno sa prugom. Topologija mreže je većinom zvezda, što zbog strukture mreže pruga IŽS, što zbog stanja postojećih kablova. Na predmetnoj deonici su za povezivanje opreme u službenim mestima većinom korišćeni postojeći bakarni kablovi u vlasništvu IŽS i iznajmljene usluge operatora elektronskih komunikacija.

Modernizacijom je zahtevano da se postojeća ŽAT mreža i satni sistem zamene novim sistemima baziranim na *IP* tehnologiji. Takođe, zahtevano je i uvođenje novih telekomunikacionih sistema (servisa) koji su bazirani na *IP* tehnologiji, na primer sistema tehničke zaštite i sistema za informisanje putnika.

Uzimajući u obzir postojeće stanje i planirane servise, zahtevan je i novi informacioni sistem koji će podržati njihovo funkcionisanje. Takođe, zahtevano je projektovanje optičke infrastrukture koja će, između ostalog, omogućiti rad novog informacionog sistema. Zahtevana je redundantna optička infrastrukturu sa dva magistralna optička kabla koja su položena sa različitih strana pruge.

U ovom radu će biti prikazano projektno rešenje strukture novog informacionog sistema IŽS na deonici Beograd Centar – Stara Pazova – Novi Sad.

3. Optička infrastruktura

Magistralni optički kablovi su realizovani sa optičkim vlaknima (o.v.) prema preporukama *ITU-T G.657.A1*. Kablovi su različitog kapaciteta - prvi (OK1) sa 48 o.v. i drugi (OK2) sa 96 o.v. Oba kabla su uvedena u sve stanice (punom konstrukcijom ili

određenim brojem vlakana). U stanicama, oni dele kablovsku kanalizaciju, uvode u objekte i trasu u objektima.

Takođe, položen je i lokalni optički kabl sa 24 o.v. (OK3) istih karakteristika kao magistralni optički kablovi. OK3 se polaže u istu trasu kao OK1 i uvodi se punom konstrukcijom u stanice i lokacije između stanica.

Za povezivanje koncentracija telekomunikacione (TT) opreme u stanici polažu se stanični optički kablovi koji su organizovani u topologiji zvezde sa centrom u centralnoj TT prostoriji. Stanični kablovi ka koncentraciji TT opreme u zgradama su sa 24 o.v. prema preporukama *ITU-T G657*, a kablovi ka koncentracijama TT opreme na peronima su sa 8 o.v. prema preporukama *ITU-T OM3/G651.1*.

U svim kablovima su ostavljena rezervna o.v. za eventualne buduće potrebe.

4. Koncept nekritičnih servisa

Telekomunikacioni sistemi na pruži 105 su, uzimajući u obzir zahteve IŽS i činjenicu da pojedini sistemi direktno učestvuju u vođenju saobraćaja, razvrstani u dve klase:

- kritični servisi koji direktno učestvuju u vođenju saobraćaja i
- nekritični servisi (na primer VoIP sistem za nekritičnu komunikaciju, satni sistem, sistemi tehničke zaštite i sistemi za informisanje putnika) – servisi u daljem tekstu.

Poslovni informacioni sistem IŽS služi da obezbedi pouzdani prenosni sistem za nekritične servise (telekomunikacione, IT sektora IŽS i druge).

Prvi korak u projektovanju strukture poslovnog informacionog sistema je bila izrada koncepta. Koncept je izrađen za celu prugu 105 (jer je zahtevano da svi servisi na pruži čine celinu), a zatim su kroz tehničku dokumentaciju deonice razrađeni servisi i sistemi na konkretnoj deonici.

Cilj izrade koncepta je da se omogući racionalizacija broja stalno prisutnog osoblja i obezbedi optimalni odnos međusobno oprečnih zahteva da se oprema koncentriše na jednu lokaciju (na primer radi lakšeg održavanja), a servis zaštiti od toga da ispad jedne lokacije dovede do potpunog prestanka rada servisa na celoj deonici. Postizanje balansirano rešenja je pre svega bilo značajno za sisteme tehničke zaštite. Imajući ovo u vidu, usvojena je decentralizovana organizacija servisa i odgovarajuća struktura poslovnog informacionog sistema.

Konceptom su službena mesta razvrstana u jedan od četiri hijerarhijska nivoa: centralne, regionalne, subregionalne i ostale lokacije. Razvrstavanje je izvršeno na osnovu opreme servisa koja je postavljena na lokaciji (njenog značaja i uloge u funkcionisanju servisa) i samog položaja lokacije u okviru mreže pruga IŽS.

Lokacije na deonici (Beograd Centar) – Stara Pazova – (Novi Sad) su razvrstane na sledeći način:

- centralna lokacija je stanica Beograd Centar i nadležna je za obe regionalne lokacije;
- regionalne lokacije su stanica Beograd Centar i stanica Novi Sad i svaka je nadležna za odgovarajući broj okolnih subregionalnih lokacija;
- subregionalne lokacije su stanica Beograd Centar, Postavnica Zemun, stanica Batajnica, stanica Indija i stanica Novi Sad i svaka je nadležna za odgovarajući broj okolnih lokacija;

- ostale lokacije su sve druge stanice, sva stajališta, objekti stabilnih postrojenja električne vuče (SPEV), saobraćajno transportno otpremništvo (STO), objekti za potrebe novoprojektovanog sistema *GSM-R (Open Green Field BTS)* lokacije – *OGF*) i lokacije procenjene kao kritične (tuneli i mostovi dužine preko 50m i lokacije mernih stanica).

Stanica Beograd Centar je centralna lokacija za celu prugu 105, dok je stanica Novi Sad subregionalna i regionalna lokacija i za lokacije na drugoj deonici.

Usvojena decentralizovana organizacija sistema će biti prikazana na primeru nekritične VoIP komunikacije. Centralna VoIP centrala je smeštena na centralnoj lokaciji u Beograd Centru dok su subregionalne lokacije opremljene lokalnim VoIP centralama. U svim stanicama su predviđeni VoIP telefoni. U slučaju gubitka komunikacije između centralne i jedne subregionalne lokacije korisnici sistema koji su “podređeni” toj subregionalnoj lokaciji mogu da komuniciraju međusobno, ali ne mogu da komuniciraju sa korisnicima koji su “podređeni” drugim subregionalnim lokacijama. Kako je na ostalim lokacijama na mreži pruga IŽS u funkciji postojeća ŽAT mreža, predviđeno je da se ostvari veza centralne VoIP centrale sa čvorištem postojeće ŽAT mreže u poslovnoj zgradi u Nemanjinoj.

Predviđeni poslovno informacioni sistem svojom strukturom (odabrani uređaji, njihov raspored i način povezivanja optičkim kablovima) prati zahteve organizacije servisa i omogućava postizanje balansa stvarajući komunikaciju između opreme u istom službenom mestu kao i komunikaciju između opreme u različitim službenim mestima.

5. Struktura poslovnog informacionog sistema IŽS

Tehničkom dokumentacijom za pod-deonicu (Beograd Centar) – Stara Pazova je projektovan proširiv i podesiv poslovni informacioni sistem, koji može da funkcioniše i u slučaju da izvođenje druge pod-deonice nije završeno. Tehničkom dokumentacijom druge pod-deonice je predviđeno opremanje lokacija na drugoj pod-deonici kao i prilagođenje opreme projektovane na prvoj pod-deonici tako da se formira jedinstvena struktura za celu deonicu. Tehničkom dokumentacijom uređenja objekta Centralne postavnice u okviru stanice Beograd Centar predviđeno je uređenje prostora za smeštaj opreme centralne lokacije.

Organizacija servisa i težnja da se predvidi sistem što je moguće otporniji na ispad jedne lokacije ili prekid jednog kabla na jednom mestu je uslovlila opremanje svake lokacije glavnim uređajem poslovnog informacionog sistema IŽS za tu lokaciju (u daljem tekstu uređaj). Izbor uređaja je određen na osnovu hijerarhijskog nivoa lokacije. Za međusobno povezivanje uređaja korišćen je po jedan par o.v. iz OK1, OK2 i OK3.

Centralna, regionalne i subregionalne lokacije, kao i postojeće centralno čvorište u poslovnoj zgradi lociranoj u Nemanjinoj ulici su opremljene i *OTN/DWDM* uređajima koji su povezani u prsten formiran po jednim parom o.v. iz OK1 i OK2.

Struktura poslovnog informacionog sistema na deonici je prikazana na Slici 1.

Sistem na deonici je organizovan u tri sloja:

- *MPLS Core* sloj (centralni sloj) koji obuhvata službena mesta sa *Label Switching Node (LSN)* uređajima. Njega čine centralna i regionalne lokacije.
- *MPLS Edge* sloj (granični sloj) koji obuhvata službena mesta sa *Edge Label Switching Node (ELSN)* uređajima. Njega čine subregionalne lokacije i poslovna zgrada locirana u Nemanjinoj ulici.
- *Access* sloj (pristupni sloj) koji obuhvata ostale lokacije. Ove lokacije su opremljene *Access Switching Node (ASN)* uređajima ili samo *Layer 2 Switch Node (L2SN)* uređajima. U zavisnosti od količine opreme i tipova servisa na lokaciji, na stanicama, stajalištima, STO, *OGF*, objektima u kompleksu tunela Čortanovci postavljeni su *ASN* uređaji tipa 3, 2 ili 1. SPEV su opremljena *ASN* uređajima tipa 4. *L2SN* su postavljeni na mestima gde je prisutan samo jedan ili dva servisa (na kritičnim lokacijama).

LSN, *ELSN* i *ASN* tipa 3 su ruteri, dok su *ASN* tipa 4, 2 i 1 *Layer 3* svičevi. Svi uređaji su namenjeni pre svega za vezivanje na optička vlakna OK1, OK2, OK3 i staničnih kablova. Opremljeni su odgovarajućim *SFP* transiver modulima i imaju rezervne nepopunjene *SFP* portove.

Kao osnovni protokol za rutiranje u centralnom i graničnom sloju je planiran *MPLS*. Kao interni protokol za dinamičko rutiranje je planiran *OSPF*. Kao protokol za razmenu labela je planiran *LDP*.

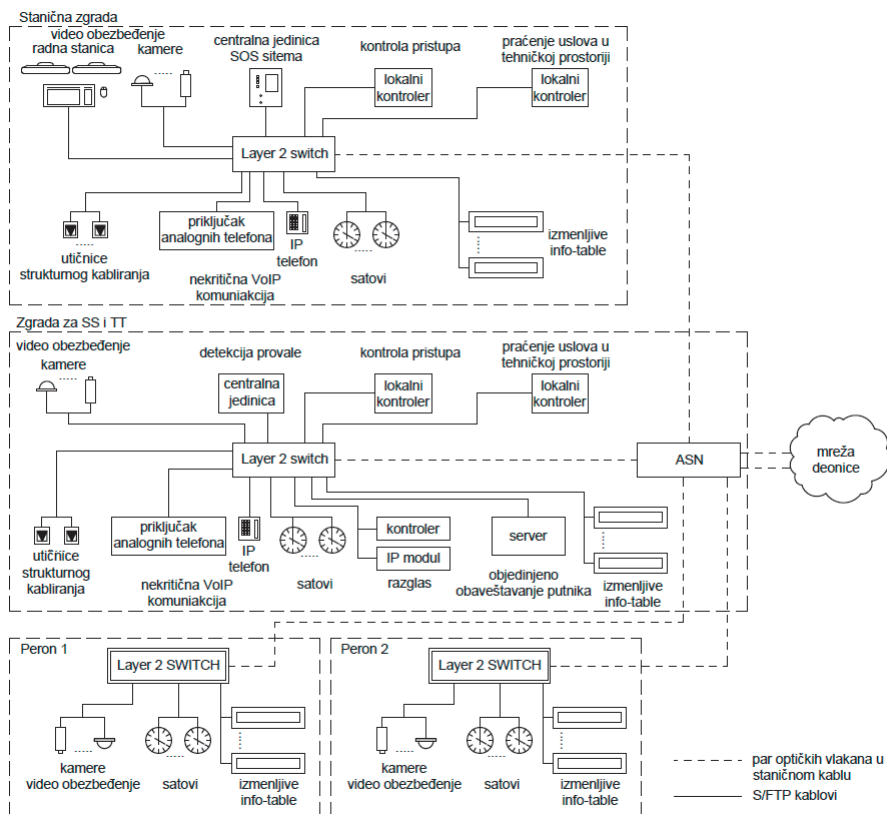
Da bi se postiglo povećanje pouzdanosti sistema, projektovani su *LSN* uređaji sa udvojenim ključnim elementima (ventilatorima, procesorskim i linijskim pločama). *LSN*, *ELSN* i *ASN* uređaji su planirani sa udvojenim napojnim jedinicama.

Prikazano povezivanje optičkim kablovima sa adekvatnim uređajima omogućava da se saobraćaj u slučaju prekida optičkog kabla sa "leve" strane jednog uređaja preusmeri na optički kabl sa "desne" strane istog uređaja.

Kao što je rečeno, poslovni informacioni sistem omogućava funkcionisanje različitih servisa koji koriste različite protokole za međusobnu komunikaciju opreme duž deonice. Komunikacija sistema tehničke zaštite na deonici je bazirana na *IPv4* protokolu. Isti protokol koriste i sistemi za obaveštavanje putnika - *IP* moduli za komunikaciju sistema razglasa i izmenljive info-table. Satovi se sinhronizuju matičnim časovnikom preko *NTP*. VoIP sistem za nekritičnu komunikaciju je baziran na *SIP*.

Međusobno odvajanje servisa je osigurano planiranjem opreme koja omogućava organizovanje virtuelnih oblaka (*MPLS L3VPN*, *VRF*) i virtuelnih mreža (*VLAN*).

Struktura sistema u službenom mestu će biti prikazana na primeru tipske stanice u pristupnom sloju. Između *ASN* uređaja i svičeva smeštenih u ostale koncentracije TT opreme u stanici je formirana ranije opisana optička mreža u obliku zvezde. U stanici je *S/FTP* kablovima cat 6a formirana instalacija po principu strukturnog kabliranja u cilju omogućavanja fleksibilnog povezivanja koncentracija TT opreme i krajnje opreme u polju (na primer kamera, radnih stanica, kontrolera, satova, info-displeja i telefona). Na osnovu količine i tipova krajnje opreme u polju i opreme u ormanima (na primer servera, priključaka analognih telefona i *IP* modula), predviđen je i odgovarajući broj *Layer 2* svičeva i *Layer 2 svičeva* sa portovima koji zadovoljavaju zahteve standarda IEEE 802.3at za *PoE (Power over Ethernet)*. Struktura sistema na tipskoj stanici u pristupnom sloju sa pregledom servisa koji je koriste je prikazana na Slici 2.

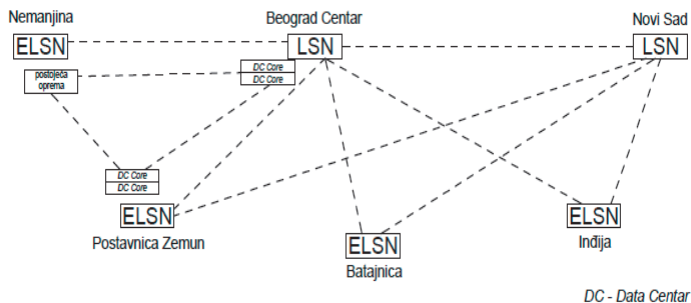


Slika 2: Struktura sistema u tipskoj stanici

U Postavnici Zemun je formirano novo čvorište za potrebe IT sektora IŽS u koje su postavljeni serveri i storage uređaji. Princip povezivanja ove opreme poslovnog informacionog sistema je u skladu sa *Top Of the Rack switching (TOR)* arhitekturom. Svaki orman u koji se postavljaju serveri i storage uređaji je opremljen jedim TOR svičem (*Layer 2* svičem) na koji su svi uređaji u ormanu povezani. Centralni komunikacijski orman u prostoriji je opremljen sa dva *Data Center Core (DC Core)* sviča (*Layer 3* sviča). Svaki TOR svič je povezan na svaki DC Core svič, dok su oba DC Core sviča povezana na *ELSN* i *OTN/DWDM* uređaj na lokaciji. U stanici Beograd Centar su, radi ostvarivanja veze sa opremom postojećeg čvorišta, predviđena dva DC Core sviča koja su povezana na *LSN* i *OTN/DWDM* uređaj na lokaciji. Drugo postojeće čvorište se nalazi u poslovnoj zgradi lociranoj u Nemanjinoj ulici gde je planirano ostvarivanje veze *ELSN* i *OTN/DWDM* uređaja direktno sa postojećom opremom.

Postavljanjem *OTN/DWDM* uređaja omogućeno je da se razmena saobraćaja između uređaja u centralnom i graničnom sloju odvija i preko direktnih linkova (kanala) protoka 10Gb/s. Opremanjem poslovne zgrade locirane u Nemanjinoj ulici je omogućeno bolje iskorišćenje slobodnog para o.v. u postojećem kablju. Ukupan saobraćaj je podeljen na saobraćaj za potrebe IT sektora IŽS (komunikacija DC Core uređaja u Postavnici Zemun i stanici Beograd Centar i postojeće opreme u poslovnoj zgradi lociranoj u Nemanjinoj

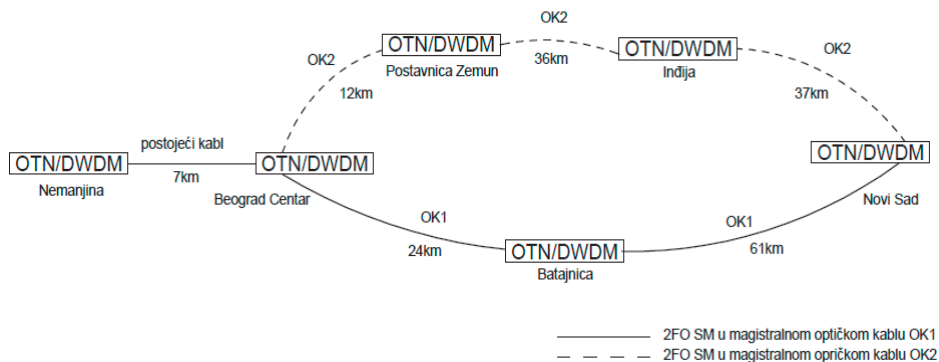
ulici) i za potrebe ostalih servisa (komunikacija uređaja na centralnim, regionalnim i subregionalnim lokacijama). Kao generalni princip za prugu 105 je usvojeno da se za svaku subregionalnu lokaciju formiraju dva linka – po jedan ka različitim regionalnim lokacijama. Za svaki link se formira primarna i zaštitna konekcija (pravac). “Povezivanje” lokacija u centralnom i graničnom sloju linkovima protoka 10Gb/s na predmetnoj deonici je prikazano na Slici 3.



Slika 3: Povezivanja uređaja linkovima protoka 10Gb/s

Predviđeni OTN/DWDM uređaji imaju mogućnost procesiranja do 40 kanala protoka 10Gb/s i podesiv izbor talasne dužine u C kanalu čime je formiran proširiv sistem.

Procenjena dužina optičkog linka između stanice Beograd Centar i Novi Sad je oko 85km. Da bi se smanjilo slabljenje signala usled dužine kablova, prsten između OTN/DWDM uređaja je realizovan direktnim povezivanjem OTN/DWDM uređaja svake druge lokacije, kao što je prikazano na Slici 4.



Slika 4. Detalj povezivanja OTN/DWDM uređaja u prsten optičkim kablovima

Zaštitna konekcija i prsten optičkih kablova omogućavaju da se u slučaju prekida optičkog kabla sa “leve” strane jednog OTN/DWDM uređaja saobraćaj preusmeri na optički kabl sa “desne” strane istog OTN/DWDM uređaja.

Podešavanje i praćenje rada poslovno informacionog sistema kao i konfigurisanje usluga je realizovano kroz Network Management System (NMS). NMS omogućava zaposlenima IT sektora IŽS udaljeni pristup sistemu iz poslovne zgrade locirane u Nemanjinoj ulici.

6. Zaključak

Struktura poslovnog informacionog sistema obuhvata opremanje svih lokacija predmetne deonice uređajima međusobno povezanim optičkim kablovima. Formiran je savremen sistem zasnovan na sopstvenim resursima koje osoblje IŽS može da nadzire i konfiguriše. Kako su za povezivanje uređaja korišćena optička vlakna iz različitih optičkih kablova, uspostavljene putanje „levo“ i „desno“ od uređaja i formiran prsten za povezivanje OTN/DWDM uređaja, sistem je otporan na prekid jednog kabla na jednom mestu. Razdvajanjem trase za polaganje magistralnih kablova na otvorenoj pruži, smanjena je verovatnoća istovremenog prekida oba kabla usled ugrožavanja trase na njenom najosetljivijem delu. Odabirom uređaja sa udvojenim ključnim elementima povećana je pouzdanost samih uređaja. Na ovaj način je povećana pouzdanost sistema i samim tim svih servisa koji ga koriste. Takođe, omogućena je nezavisnost IŽS od usluga operatora elektronskih komunikacija.

Uspostavljanjem poslovno informacionog sistema koji povezuje sva službena mesta formirana je neophodna osnova za uspostavljanje novih i modernizaciju postojećih servisa. Uspostavljen je sistem za informisanje putnika izmenljivim info-tablama i poboljšano informisanje razglasom. Takođe, omogućeno je uspostavljanje sistema video obezbeđenja koji povećava bezbednost putnika i opreme. Poslovno informacioni sistem je iskorišćen i za poboljšanje uslova rada službenog osoblja (uspostavljanjem nekritične VoIP komunikacije i satnog sistema na radnim mestima osoblja).

Sistem je baziran na standardnim, otvorenim i često zastupljenim tehnologijama i protokolima što ga čini fleksibilnim i pogodnim za uspostavljanje širokog spektra servisa. Ostavljena je rezerva o.v. u kablovima i predviđeni su uređaji koji se mogu proširiti novim konekcijama. U prostorijama za smeštaj opreme ostavljen je slobodan prostor za postavljanje dodatne opreme. Ovim je formirana mogućnost za kasnija proširenja sistema u skladu sa novim potrebama IŽS.

Deonica je zvanično otvorena za saobraćaj marta 2022. Predstavljeni poslovni informacioni sistem je izveden i pruža podršku uspostavljenim servisima.

Literatura

- [1] Tatjana Knežević, Projekat za izvođenje, Modernizacija pruge Beograd – Subotica – državna granica (Kelebija), deonica pruge Beograd – Stara Pazova, 5/3.2 Projekat optičkih kablova, *Saobraćajni Institut CIP*, 2018.
- [2] Tatjana Knežević, Projekat za izvođenje, Rekonstrukcija i izgradnja dvokolosečne pruge (Beograd) Stara Pazova – Novi Sad – Subotica – državna granica, faza: Elektrotehnička infrastruktura za brzine saobraćaja vozova do 200km/h, deonica Stara Pazova – Novi Sad, 5/3.2 Optički kablovi, *Saobraćajni Institut CIP*, 2021.
- [3] Jelena Radović, Idejni projekat, Modernizacija, rekonstrukcija i izgradnja pruge Beograd – Subotica – državna granica (Kelebija), deonica pruge Novi Sad – Subotica – državna granica (Kelebija), 5/5 Optički kablovi i sistem za prenos nekritičnih sistema, *Saobraćajni Institut CIP*, 2020.
- [4] Jelena Radović, Projekat za izvođenje, Modernizacija pruge Beograd – Subotica – državna granica (Kelebija), deonica pruge Beograd – Stara Pazova, 5/3.3 Opremanje stanica i stajališta telekomunikacionim sistemima – Opšta sveska, *Saobraćajni Institut CIP*, 2018.

- [5] Jelena Radović, Projekat za izvođenje, Rekonstrukcija i izgradnja dvokolosečne pruge (Beograd) Stara Pazova – Novi Sad – Subotica – državna granica, faza: Elektrotehnička infrastruktura za brzine saobraćaja vozova do 200km/h, deonica Stara Pazova – Novi Sad, 5/3.3.1 Informaciono-komunikacioni sistemi – Opšta sveska, *Saobraćajni Institut CIP*, 2021.
- [6] Jelena Radović, Projekat za izvođenje, Centralna postavnica u okviru železničke stanice Beograd Centar za potrebe smeštaja centralnih uređaja za kontrolu i upravljanje prugom Beograd – Subotica – državna granica (Kelebija), 5/2.2 Projekat opremanja železničke stanice Beograd Centar sistemima nekritičnih servisa, *Saobraćajni Institut CIP*, 2021.

Abstract: *The (Beograd Centar) - Stara Pazova - Novi Sad - Subotica - state border (Kelebija) line is the magistral line of Serbian railway system. The line is important in national traffic because it connects major railway junctions - Beograd, Novi Sad and Subotica, as well as a large number of other settlements and industrial zones. The international importance of the railway is reflected in the fact that it connects parts of central, western and eastern Europe with Greece and the Middle East. As part of the modernization, reconstruction and construction of the section (Beograd Centar) - Stara Pazova - (Novi Sad), a two-track railway for mixed (passenger and freight traffic) with a speed of up to 200 km/h was designed. Among other things, various passenger information systems, technical protection systems and railway telecommunication systems were designed. In this paper, the designed principle solution of the structure of business information system of the Infrastructure of the Railways of Serbia for the transmission of services that are not of critical importance for the traffic is presented. An IP/MPLS network organized in layers is designed, which relies on the designed ring of optical cables.*

Keywords: *railway telecommunication systems, business information systems, IP/MPLS network*

DESIGNING OF THE STRUCTURE OF THE INFRASTRUCTURE OF RAILWAYS OF SERBIA BUSINESS INFORMATION SYSTEM ON THE (BEOGRAD CENTAR) - STARA PAZOVA - NOVI SAD SECTION

Jelena Radović, Ana Ilić

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.019>

UNAPREĐENJE PROTOKOLA RUTIRANJA ZA VANET MREŽE KORIŠĆENJEM MAŠINSKOG UČENJA

Nenad Jevtić, Marija Malnar, Pavle Bugarčić
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet
n.jevtic@sf.bg.ac.rs, m.malnar@sf.bg.ac.rs, p.bugarcic@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Ukoliko se mrežna topologija stalno menja, korišćenje iste putanje za slanje podataka u dužem vremenskom periodu dovodi do degradiranja brojnih mrežnih performansi. Ovaj problem se javlja kod primene tradicionalnih protokola rutiranja u bežičnim ad hoc mrežama za vozila (Vehicular Ad-hoc Networks, VANETs). Zato je korisno pratiti stanje mrežnog okruženja i u skladu sa tim birati najbolju putanju za slanje podataka. Mehanizam kojim se ovo na vrlo efikasan način omogućava naziva se učenje potkrepljivanjem (Reinforcement Learning, RL), koje predstavlja posebnu kategoriju mašinskog učenja. U ovom radu pokazano je kako primena RL unapređuje tradicionalne protokole rutiranja, poređenjem poznatog Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) protokola, Q-Learning AODV (QLAODV) protokola, koji predstavlja modifikaciju AODV baziranu na RL, i Adaptive Routing Protocol based on Reinforcement Learning (ARPR) protokola koji takođe koristi RL za rutiranje podataka. Rezultati simulacija su pokazali da protokoli bazirani na RL daju značajno bolje performanse u poređenju sa AODV protokolom.*

Ključne reči: *protokoli rutiranja, mašinsko učenje, VANET*

1. Uvod

Bežične *ad hoc* mreže za vozila (*Vehicular ad hoc Networks*, VANETs) predstavljaju posebnu kategoriju bežičnih *ad hoc* mreža (*Wireless ad hoc Networks*, WANETs) kod kojih mrežne čvorove čine vozila koja žele da ostvare bežičnu komunikaciju. *Ad hoc* mreže su specifične po tome što nemaju fiksnu komunikacionu infrastrukturu, već se veza između krajnjih čvorova uspostavlja samo u slučaju potrebe za slanjem podataka. Svi čvorovi u mreži imaju ulogu rutera, a putanja kojom će se prosledivati podaci definiše se pomoću odgovarajućeg protokola rutiranja. Iako u poslednje vreme sve veću pažnju privlači 5G mreža, koja omogućava značajno veće protoke i manji procenat izgubljenih paketa, VANET mreže i dalje imaju određene prednosti zbog kojih su veoma značajan segment inteligentnih transportnih sistema. Najveća prednost VANET mreža leži u njihovoj jednostavnosti i relativno maloj ceni implementacije, s obzirom da nisu potrebna visoka inicijalna ulaganja u mrežnu

infrastrukturu. Takođe, veliki problem 5G mreža je njihova i dalje ne tako široka rasprostranjenost, kako zbog visokih troškova implementacije tako i zbog određenih društvenih neslaganja sa njihovim uvođenjem. Poznato je da u Republici Srbiji i dalje nije uvedena 5G mreža, kao ni u mnogim zemljama u razvoju, tako da je kreiranje VANET mreža najbolji način za ostvarivanje komunikacije između vozila, posebno u urbanim sredinama i na pametnim autoputevima.

Veoma bitan segment za nesmetano funkcionisanje VANET mreža je izbor adekvatnog protokola rutiranja. U ovom radu će biti izvršena simulaciona analiza i poređenje rezultata primene tradicionalnog protokola rutiranja i protokola rutiranja baziranih na učenju potkrepljivanjem. Testiranje je izvršeno u NS-3 (*Network Simulator 3*) [1] simulatoru, koji omogućava implementaciju i testiranja novih protokola rutiranja. Upoređeni su rezultati primene AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) protokola [2] kao predstavnika tradicionalnih protokola rutiranja, čiji je model već implementiran u NS-3 simulatoru, sa rezultatima primene QLAODV (*Q-Learning AODV*) [3] i ARPRL (*Adaptive Routing Protocol based on Reinforcement Learning*) [4] protokola koji se baziraju na učenju potkrepljivanjem. Za testiranje poslednja dva protokola bila je neophodna njihova implementacija u NS-3 simulatoru. Opis i implementacija ARPRL protokola izvršeni su u [5], pa će u ovom radu fokus biti na QLAODV protokolu. Poređenje protokola je izvršeno na osnovu procenta izgubljenih paketa (*Packet Loss Ratio*, PLR), prosečnog kašnjenja s kraja na kraj mreže (*End to End Delay*, E2ED) i procenta korisnog saobraćaja (*Useful Traffic Ratio*, UTR).

Nastavak rada je organizovan na sledeći način. U drugom poglavlju predstavljena je problematika rutiranja u VANET mrežama, zatim je u trećem poglavlju opisan princip funkcionisanja QLAODV protokola. U četvrtom poglavlju su prikazani rezultati simulacione analize gore pomenutih protokola, a u petom poglavlju su data zaključna razmatranja.

2. Rutiranje u VANET mrežama

Protokoli rutiranja u bežičnim komunikacionim mrežama imaju zadatak da obezbede optimalnu putanju za prosleđivanje podataka od izvora do odredišta, preko niza međučvorova. Ovaj zadatak postaje prilično komplikovan u slučaju visoko dinamičnih mreža, kao što su VANET mreže. Osnovna karakteristika VANET mreža je relativno velika brzina kretanja mrežnih čvorova, što prouzrokuje česte promene u mrežnoj topologiji. Ovo značajno otežava održavanje optimalne putanje za slanje podataka, zbog čestih prekida linkova koji su deo trenutnih putanja. Rešenje ovog problema može biti u uključivanju mašinskog učenja u proces izbora optimalne putanje. Tip mašinskog učenja koji najviše odgovara ovako dinamičnim mrežama je učenje potkrepljivanjem (*Reinforcement Learning*, RL) [6], koje podrazumeva stalnu interakciju agenta učenja sa okruženjem kroz preduzimanje određenih akcija prema okruženju, na šta okruženje odgovara odgovarajućom nagradom (ili kaznom) za preduzetu akciju i informacijom o novom stanju okruženja nakon preduzete akcije.

Kod VANET mreža agent učenja može biti određeni čvor (vozilo) u mreži, akcije koje preduzima ovaj agent ogledaju se u izboru sledećeg čvora za slanje paketa ka odredištu, a okruženje predstavljaju svi ostali čvorovi u mreži. Vozila dobijanjem periodičnih povratnih informacija od okruženja prate njegove promene, prilagođavaju im se i imaju mogućnost da uvek izaberu najbolju putanju za slanje podataka. Jedan od

najčešće korišćenih tipova RL u VANET mrežama je Q-učenje (*Q-Learning*, QL) [7], u kom čvorovi na osnovu interakcija sa okruženjem računaju Q-vrednosti za sve putanje do odgovarajućih odredišta, preko svojih susednih čvorova. Ove Q-vrednosti čvorovi čuvaju u svojoj Q-tabeli, na osnovu koje biraju sledeći čvor za slanje podataka ka odredištu.

Protokole bazirane na RL je moguće primeniti i u brojnim drugim mrežama, kao što su bežične senzorske mreže (*Wireless Sensor Networks*, WSN), mobilne *ad hoc* mreže (*Mobile Ad-hoc Networks*, MANET) ili bežične *ad hoc* mreže za bespilotne letelice (*Flying Ad-hoc Networks*, FANET). Takođe, pored QL koji je opisan u ovom radu, moguće je primeniti brojne druge tipove RL, kao što su SARSA algoritam, DRL (*Deep Reinforcement Learning*), DDRL (*Dueling DRL*) ili MBRL (*Model-Based RL*). Testiranje složenijih tipova RL u scenarijima sa većim brojem čvorova zahteva računare izuzetno velike procesorske moći, kako bi simulacije bile obavljene u razumnom vremenskom periodu.

3. QLAODV protokol

Kako bi se protokol rutiranja što bolje prilagodio dinamičkoj prirodi VANET mreža, razvijene su brojne modifikacije postojećih protokola koje uz pomoć učenja potkrepljivanjem pokušavaju da unaprede mrežne performanse stalnom interakcijom sa mrežnim okruženjem [8]. QLAODV protokol predstavlja modifikaciju jednog od najpoznatijih reaktivnih protokola rutiranja, AODV protokola. Princip otkrivanja putanje kod QLAODV protokola je sličan kao kod AODV protokola. Glavna promena je u uvođenju konstantnog periodičnog slanja *Hello* poruka ka susedima. Putem ovih poruka čvorovi razmenjuju svoje znanje o okruženju, na osnovu čega se ažuriraju Q-vrednosti koje određuju kojom putanjom će se slati paketi podataka. Svaki čvor održava tabelu Q-vrednosti za putanje ka svakom odredištu u mreži, preko svih susednih čvorova. Kada šalje pakete ka nekom odredištu, čvor uvek bira onu putanju preko svog suseda koja ima najveću Q-vrednot.

<i>IP adresa pošiljaoca</i>
<i>Skv. broj Hello paketa</i>
<i>Faktor mobilnosti</i>
<i>Faktor propusnog opsega</i>
<i>Broj maks. Q-vrednosti</i>
<i>Maks. Q-vrednost suseda [1]</i>
<i>...</i>
<i>Maks. Q-vrednost suseda [n]</i>

Slika 1. Struktura Hello paketa kod QLAODV protokola

Čvorovi periodično šalju *Hello* pakete ka svojim susedima, kako bi im dostavili podatke neophodne za ažuriranje Q-vrednosti. Izbor podataka koje čvor šalje u ovim

porukama od ključnog je značaja za kreiranje adekvatne slike agenta učenja o stanju mreže. Struktura *Hello* paketa prikazana je na slici 1. IP adresa je neophodna za identifikaciju čvora pošiljaoca na prijemu, sekvencijalni broj prati redosled pristiglih *Hello* paketa, dok ostali parametri služe za računanje Q-vrednosti. Faktor mobilnosti i faktor propusnog opsega oslikavaju uticaj relativnog kretanja susednih čvorova i opterećenosti veze preko čvora pošiljaoca. Broj maksimalnih Q-vrednosti odgovara broju odredišta do kojih čvor koji šalje *Hello* paket ima putanju, nakon čega sledi niz maksimalnih Q-vrednosti za putanje (preko najboljeg suseda) do svakog odredišta.

Po prijemu *Hello* paketa od nekog suseda x , čvor s ažurira Q-vrednosti za putanje ka svim odredištima d koje idu preko ovog suseda, primenjujući sledeću formulu:

$$Q_s(d, x) = (1 - \alpha) * Q_s(d, x) + \alpha [R + \gamma_x * \max_{y \in N_x} Q_x(d, y)] \quad (1)$$

gde N_x predstavlja skup svih suseda čvora x , α i γ_x označavaju stepen učenja i diskontni faktor, R predstavlja nagradu, a $\max_{y \in N_x} Q_x(d, y)$ predstavlja maksimalnu Q-vrednost koju ima čvor x za putanju ka odredišnom čvoru d preko nekog od svojih suseda. Stepenn učenja može biti u opsegu od 0 do 1 i on određuje nivo uticaja promena u mrežnom okruženju na izbor putanje za slanje podataka. Ovaj koeficijent ne bi smeo da bude preveliki, jer bi čvorovi prebrzo učili i svaka promena u mreži bi previše brzo menjala Q-vrednosti i dovodila do nestabilnosti mreže. Ali stepen učenja ne treba da bude ni premali kako čvorovi ne bi presporo pratili promene u mrežnom okruženju. U ovom protokolu α ima fiksnu vrednost od 0,8, do čega se došlo eksperimentalnim putem.

Diskontni faktor određuje važnost budućih Q-vrednosti i u QLAODV protokolu se računa na sledeći način:

$$\gamma_x = \gamma * \sqrt{(MF_x * BF_x)} \quad (2)$$

gde γ ima fiksnu vrednost od 0,9, a MF_x i BF_x predstavljaju faktor mobilnosti i faktor uticaja propusnog opsega za čvor x , respektivno. Oba faktora se računaju u čvoru x i šalju čvoru s u okviru *Hello* paketa. Faktor mobilnosti se računa na sledeći način:

$$MF_x = \begin{cases} \sqrt{\frac{|N_x \cap N_x^p|}{|N_x \cup N_x^p|}}, & \text{za } N_x \cup N_x^p \neq \emptyset \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (3)$$

gde N_x predstavlja trenutni skup suseda čvora x , dok N_x^p predstavlja skup suseda čvora x u trenutku slanja prethodnog *Hello* paketa. Očigledno je da se na ovaj način pednost daje stabilnijim putanjama, gde nema velikih promena u okruženju posmatranog čvora x . Faktor uticaja propusnog opsega računa se preko sledeće jednačine:

$$BF_x = \frac{\text{Dostupan propusni opseg čvora } x}{\text{Maksimalni propusni opseg za čvor } x} \quad (4)$$

Dostupni propusni opseg čvora x može se dobiti oduzimanjem iskorišćenog propusnog opsega od maksimalnog propusnog opsega za čvor x . Iskorišćeni propusni

opseg (BW) u nekom vremenskom periodu T moguće je izračunati na osnovu sledeće jednačine:

$$BW(bps) = \frac{n \cdot S_B \cdot 8}{T} \quad (5)$$

gde n predstavlja ukupan broj paketa poslatih i primljenih od strane čvora x tokom vremenskog intervala T , a S_B je veličina paketa u bajtima. Maksimalni propusni opseg je konstantni parametar koji zavisi od karakteristika upotrebljene bežične veze i identičan je za sve čvorove u mreži. Uzimajući u obzir faktor propusnog opsega, prednost se daje putanjama koje nisu preopterećene, pa se tako može izbeći zagušenje mreže i povećanje procenta izgubljenih paketa.

Nagrada R služi za nagrađivanje direktnih putanja ka odredišnom čvoru i definisana je na sledeći način:

$$R = \begin{cases} 1, & \text{ako } s \in N_d \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (6)$$

gde je N_d skup suseda odredišnog čvora d . Drugim rečima, ukoliko čvor primi *Hello* poruku od odredišnog čvora, nagrada će biti 1, inače nagrada je 0. Nagrađivanjem direktne putanje smanjuje se broj hopova i kašnjenje paketa s kraja na kraj mreže.

Pored dinamičkog ažuriranja putanja putem razmene *Hello* paketa, QLAODV protokol obezbeđuje mehanizam provere nove putanje slanjem *unicast* RCNG-REQ i RCNG-REP paketa. Ovi paketi nisu postojali u AODV protokolu. Ukoliko čvor koji koristi određenu putanju za slanje podataka ka odredištu, otkrije novu putanju sa većom Q-vrednošću, pre promene putanje vrši proveru nove putanje slanjem RCNG-REQ kontrolnog paketa. Međučvorovi takođe prosleđuju ovaj paket preko suseda sa najvećim Q-vrednostima ka odredištu. Po prijemu RCNG-REQ paketa, odredišni čvor odgovara slanjem RCNG-REP paketa. Tek po prijemu RCNG-REP paketa međučvorovi i čvor pošiljalac ažuriraju svoju tabelu rutiranja i menjaju putanju kojom šalju pakete podataka.

3. Testiranje i analiza protokola u simulacionom okruženju

Testiranje protokola rutiranja u realnim uslovima bilo bi veoma komplikovano i skupo za realizaciju, pa se zato u tu svrhu najčešće koriste mrežni simulatori. Posebnu pogodnost daju simulatori otvorenog koda, koji istraživačima omogućavaju menjanje postojećih i implementaciju novih modela. U ovom radu je za testiranje protokola izabran NS-3 simulator, u okviru kog je već implementiran model AODV protokola. Za testiranje QLAODV protokola, bila je neohodna njegova implementacija u simulaciono okruženje. Da bi protokol nesmetano funkcionisao, bile su neohodne određene korekcije originalne verzije protokola. Takođe je izvršeno i poređenje sa ARPRL protokolom, opisanim i implementiranim u [5].

Protokoli su testirani u dva različita scenarija, koji odgovaraju scenarijima iz [3] i [4]. Prvi scenario podrazumeva simulaciono područje dimenzija 1000m x 1000m, sa po 4 horizontalne i vertikalne ulice i po jednom trakom u svakom smeru. Unutar ovog područja kreće se 80 vozila od kojih 30 (nasumično izabranih) generiše CBR (*Constant Bit Rate*) saobraćaj brzine 32 kb/s. Maksimalna dozvoljena brzina čvorova varira od 1 m/s do 25 m/s. Drugi scenario čini simulaciono područje dimenzija 2000m x 2000m, sa

po 5 horizontalnih i vertikalnih ulica, svaka ulica ima po dve trake za kretanje vozila u oba smera, gde svaka raskrsnica ima semafor. Maksimalna dozvoljena brzina za kretanje vozila je 15 m/s. Ukupan broj vozila varira od 50 do 350, pri čemu uvek 20 nasumično izabranih vozila generiše CBR saobraćaj brzine 4 kb/s.

Ostali parametri simulacije su identični za oba scenarija. Za generisanje mobilnosti vozila korišćen je SUMO (*Simulation of Urban MObility*) simulator [9]. Koristi se IEEE 802.11p standard za bežične mreže, sa propusnim opsegom od 10 MHz i protokom od 6 Mb/s. Za model propagacije odabran je *Two Ray Ground*, a na transportnom sloju je korišćen UDP (*User Datagram Protocol*) protokol. Aplikacioni sloj generiše pakete veličine 512B. Ostali parametri imaju podrazumevana podešavanja za mrežni simulator. Pregled najvažnijih parametara prvog i drugog simulacionog scenarija prikazani su u tabelama 1 i 2, respektivno.

Tabela 1. Pregled parametara prvog simulacionog scenarija

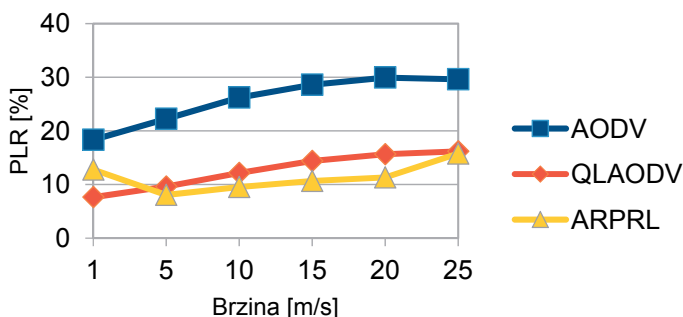
Parametar	Vrednost
Dimenzije prostora	1000 m x 1000 m
Ulice	Po 4 horizontalne i vertikalne ulice
Trajanje simulacije	600 s
Ukupan broj vozila	80
Maksimalna brzina vozila	1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s
Model mobilnosti	<i>Manhattan Grid</i>
Propagacioni model	<i>Two Ray Ground</i>
MAC	IEEE 802.11p, širina kanala 10 MHz, protok 6 Mb/s
Protokol rutiranja	AODV, ARPRL, QLAODV
Transportni protokol	UDP
Aplikacioni protok	32 kb/s (CBR, 30 vozila)
Veličina paketa	512 B

Tabela 2. Pregled parametara drugog simulacionog scenarija

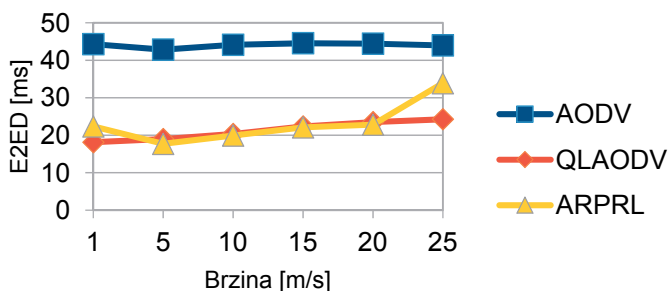
Parametar	Vrednost
Dimenzije prostora	2000 m x 2000 m
Ulice	Po 5 horizontalnih i vertikalnih ulica
Trajanje simulacije	600 s
Ukupan broj vozila	50, 100, 150, 200, 250, 300, 350
Maksimalna brzina vozila	15 m/s
Model mobilnosti	<i>Manhattan Grid</i>
Propagacioni model	<i>Two Ray Ground</i>
MAC	IEEE 802.11p, širina kanala 10 MHz, protok 6 Mb/s
Protokol rutiranja	AODV, ARPRL, QLAODV
Transportni protokol	UDP
Aplikacioni protok	4 kb/s (CBR, 20 vozila)
Veličina paketa	512 B

Poređenje protokola je izvršeno na osnovu tri relevantne mrežne performanse, procenta izgubljenih paketa (PLR), prosečnog kašnjenja s kraja na kraj mreže (E2ED) i procenta korisnog saobraćaja (UTR). Posmatrajući prvi scenario, može se zaključiti da

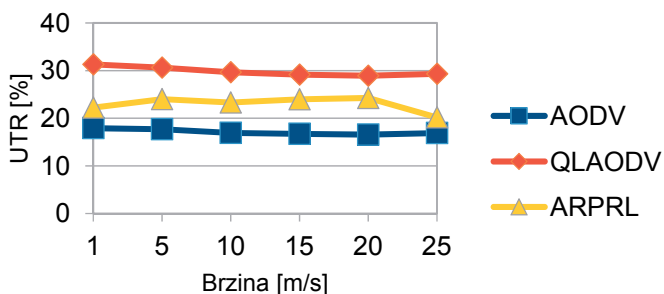
QLAODV, slično kao ARPRL, pokazuje značajno bolje performase u pogledu PLR (slika 2) i E2ED (slika 3) u odnosu na AODV protokol, kako pri manjim tako i pri većim brzinama kretanja vozila. Ovo je definitivno posledica boljeg izbora putanja i brzog otkrivanja promena u topologiji mreže, što je omogućeno stalnom interakcijom čvorova (koji šalju pakete) sa okruženjem. Posmatrajući UTR u prvom scenariju (slika 4), primetno je da QLAODV pokazuje najbolje rezultate, što znači da se koristi manje kontrolnih paketa, koji samim tim unose manje dodatno opterećenje mreže.



Slika 2. Zavisnost procenta izgubljenih paketa od maksimalne dozvoljene brzine čvorova u mreži

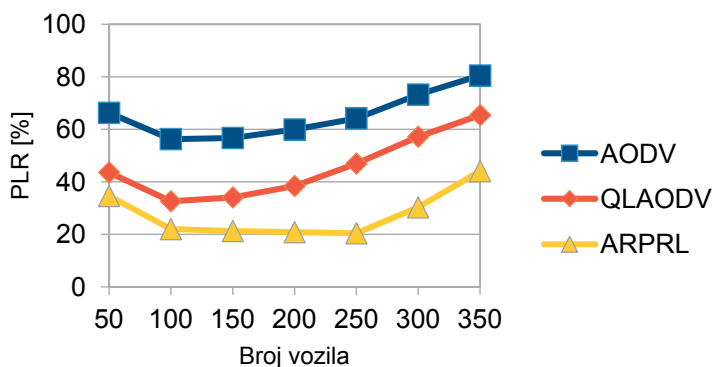


Slika 3. Zavisnost prosečnog kašnjenja paketa s kraja na kraj mreže od maksimalne dozvoljene brzine čvorova u mreži

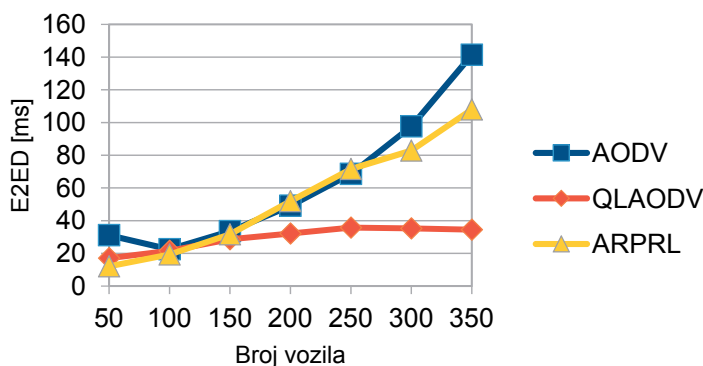


Slika 4. Zavisnost procenta korisnog saobraćaja od maksimalne dozvoljene brzine čvorova u mreži

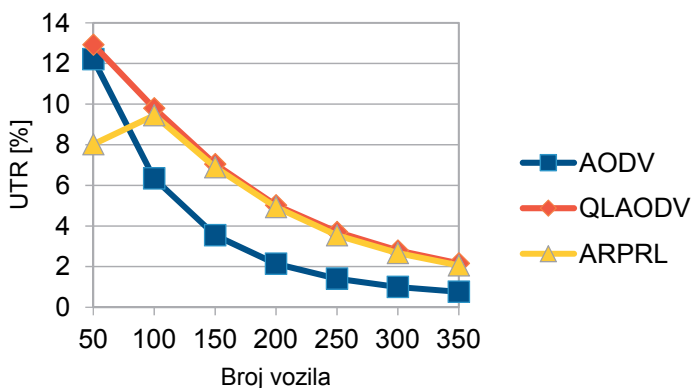
U drugom scenariju analizirani su mrežni parametri uz varijaciju ukupnog broja čvorova u mreži. Može se primetiti da i u ovom scenariju QLAODV protokol pokazuje značajno bolje performanse u pogledu PLR (slika 5) i UTR (slika 7) u odnosu na AODV protokol, a u pogledu E2ED (slika 6) ubedljivo najbolje performanse pri većem broju čvorova u mreži. Sa druge strane, ARPRL protokol pokazuje najbolje performanse u pogledu PLR u ovom scenariju, što govori da je nešto pogodniji za pokrivanje većih oblasti sa većim brojem vozila. U svakom slučaju, oba protokola bazirana na primeni učenja potkrepljivanjem pokazuju značajno poboljšanje performansi u poređenju sa AODV protokolom, bez obzira na veličinu simulacione oblasti, ukupan broj vozila i brzinu kojom se ova vozila kreću.



Slika 5. Zavisnost procenta izgubljenih paketa od ukupnog broja čvorova u mreži



Slika 6. Zavisnost prosečnog kašnjenja paketa s kraja na kraj mreže od ukupnog broja čvorova u mreži



Slika 7. Zavisnost procenta korisnog saobraćaja od ukupnog broja čvorova u mreži

4. Zaključak

U ovom radu je izvršena implementacija, testiranje i analiza primene AODV, QLAODV i ARPRL protokola rutiranja u VANET mrežama. Analizirajući rezultate primene pomenutih protokola, očigledno je da protokoli bazirani na učenju pokrepljivanjem značajno nadmašuju tradicionalni AODV protokol rutiranja posmatrajući ključne mrežne performanse u različitim simulacionim scenarijima. Posebno je značajno što su se ovi protokoli pokazali veoma dobro pri povećanju maksimalne dozvoljene brzine vozila, što govori o tome da uspevaju blagovremeno da isprate sve intenzivnije promene u mrežnoj topologiji i da adekvatno reaguju u slučaju prekida linkova između čvorova u mreži. Takođe, ovi protokoli su pokazali robusnost na povećanje saobraćajnog opterećenja, s obzirom da i u uslovima velikog broja vozila u mreži, a samim tim i veće opasnosti od zagušenja, pokazuju značajno bolje rezultate u poređenju sa AODV protokolom. Može se zaključiti da od testiranih protokola u slučaju velikih brzina vozila najbolje performanse pokazuje QLAODV protokol, dok je u slučaju veće gustine saobraćaja najbolje koristiti ARPRL protokol.

U budućim istraživanjima planiran je razvoj i implementacija novog protokola rutiranja, koji bi bio adekvatniji za primenu u VANET mrežama. Novi protokol bi efikasnije pratio promene u složenom mrežnom okruženju, uzimajući u obzir različite parametre kao što su rastojanje između čvorova, relativna promena rastojanja u vremenu, kašnjenje paketa s kraja na kraj mreže, pouzdanost veze, opterećenost propusnog opsega, kao i broj hopova od izvora do odredišta. Pored praćenja kvaliteta veze između susednih čvorova, protokol treba da uzme u obzir i kvalitet celokupne putanje od izvornog do odredišnog čvora, čime bi se mrežne karakteristike dodatno poboljšale.

Literatura

- [1] NS-3, [Online]. Available at: <https://www.nsnam.org/>
- [2] C. Perkins, E. Belding-Royer, and Ss Das, "Ad Hoc On demand Distance Vector (AODV) routing" RFC 3561, IETF, October 2003.

- [3] C. Wu, K. Kumekawa, and T. Kato, "Distributed reinforcement learning approach for vehicular ad hoc networks", *IEICE transactions on communications*, vol. 93, pp. 1431-1442, June 2010. DOI: 10.1587/transcom.E93.B.1431
- [4] J. Wu, M. Fang, and X. Li. "Reinforcement Learning Based Mobility Adaptive Routing for Vehicular Ad-Hoc Networks", *Wireless Personal Communications*, vol. 101, pp. 2143-2171, May 2018. DOI: 10.1007/s11277-018-5809-z
- [5] N. Jevtić, P. Bugarčić. "Analiza protokola rutiranja baziranih na učenju potkrepljivanjem za VANET mreže", in *XL Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2022*, pp. 375-384, November 2021.
- [6] R. Sutton, A. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction, second edition*, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2018.
- [7] M. L. Littman, "Reinforcement learning improves behaviour from evaluative feedback", *Nature*, vol. 521, pp. 445-451, May 2015. DOI: 10.1038/nature14540
- [8] P. Bugarčić, N. Jevtić, M. Malnar, "Reinforcement Learning-Based Routing Protocols in Vehicular and Flying Ad Hoc Networks—A Literature Survey", *Promet*, vol. 34, pp. 893-906, December 2022. DOI: 10.7307/ptt.v34i6.4159
- [9] SUMO, [Online]. Available at: <https://www.eclipse.org/sumo/>

Abstract: *In cases when the network topology is constantly changing, using the same route to send data for a long period leads to the degradation of various network performances. This problem occurs when traditional routing protocols are applied in vehicular ad-hoc networks (VANETs). Therefore, it is useful to monitor the state of the network environment and choose the best route for sending data accordingly. The mechanism that enables this in a very efficient way is called reinforcement learning (RL), which represents a special category of machine learning. This paper shows how the application of RL improves traditional routing protocols by comparing the well-known Ad hoc on-demand distance vector (AODV) protocol, Q-learning AODV (QLAODV) protocol, which is a modification of AODV based on RL, and Adaptive routing protocol based on reinforcement learning (ARPRL) that also uses RL for data routing. The simulation results proved that the RL-based protocols show significantly better performance compared to the AODV protocol.*

Keywords: *routing protocols, machine learning, VANET*

IMPROVEMENT OF ROUTING PROTOCOLS FOR VANETS USING MACHINE LEARNING

Nenad Jevtić, Marija Malnar, Pavle Bugarčić

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.020>

PRIMENA REGRESIONIH MODELA ZA PREDIKCIJU GREŠKE POZICIONIRANJA GNSS

Ivana Stefanović¹, Snežana Mladenović², Slađana Janković², Ana Uzelac²

¹Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd – Odsek Visoka škola
elektrotehnike i računarstva, ²Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet
ivanas@viser.edu.rs, snezanam@sf.bg.ac.rs,
s.jankovic@sf.bg.ac.rs, ana.uzelac@sf.bg.ac.rs

Rezime: *Razvoj lokacijskih servisa dovodi do toga da globalni navigacioni satelitski sistemi (GNSS) postaju sastavni deo svakodnevnog života. Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja vezanih za povećanje preciznosti pozicioniranja globalnih navigacionih satelitskih sistema, u urbanom okruženju, primenom regresionih modela mašinskog učenja. U okviru rada izvršena je predikcija greške rastojanja i greške smera na osnovu podataka o elevaciji satelita. Skup podataka, koji je korišćen za istraživačku analizu, kreiran je na osnovu opsežnih rezultata merenja koja su sprovedana na različitim lokacijama u gradskom okruženju. Na osnovu rezultata kreiranog prediktivnog modela može se zaključiti da se podaci o elevaciji satelita mogu iskoristiti za predikciju greške pozicioniranja i korekciju koordinata GNSS prijemnika.*

Ključne reči: *greška pozicioniranja, predikcija, mašinsko učenje, regresija, GNSS*

1. Uvod

Lokacijski servisi kombinuju informaciju o lokaciji korisnika sa drugim informacijama od značaja, radi pružanja personalizovanih servisa korisnicima. Veliki broj aplikacija, na pametnim uređajima, koristi lokacijske servise, koji podržavaju mnoge svakodnevne aktivnosti i zadovoljavaju različite potrebe društva i privrede [1]. Lokacijski servisi koriste različite tehnike pozicioniranja, koje se međusobno razlikuju po pitanju preciznosti i dostupnosti. Na otvorenom najčešće se koriste Globalni navigacioni satelitski sistemi, kao i pozicioniranje primenom mobilne mreže [2]. Prema [3], GNSS se najčešće koriste od strane lokacijskih servisa, čak 53.2%. Razvoj lokacijskih servisa, niska cena GNSS prijemnika, mogućnost korišćenja pametnih telefona kao GNSS prijemnika i razvoj aplikacija poput *GNSS Logger*, *GNSS View*, *GPS Test*, podstakao je veliki broj istraživanja u cilju povećanja preciznosti pozicioniranja GNSS.

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja čiji je cilj povećanje preciznosti pozicioniranja primenom nadgledanog mašinskog učenja u urbanom okruženju. U okviru prethodnog istraživanja [4], izvršeno je ispitivanje da li se podaci o elevaciji i azimutu

satelita i odnosu signal/šum mogu iskoristiti, u svojoj izvornoj formi, bez dodatnih transformacija i proračuna, za predikciju greške pozicioniranja. Utvrđeno je da su podaci o elevaciji satelita najpogodniji za predikciju greške rastojanja i greške smera. U oba slučaja najbolji rezultati dobijeni su korišćenjem *DecisionTree* modela, pri čemu koeficijent determinacije iznosi 0.95 u slučaju predikcije greške rastojanja, odnosno 0.97 u slučaju predikcije greške smera. Primenom kreiranog prediktivnog modela prosečna greška rastojanja smanjena je sa 18.87m na 1.71m. Skup podataka koji je korišćen za prediktivnu analizu u [4] sadrži objedinjene rezultate merenja sa jedne lokacije, čije su koordinate (44.768327013742585, 20.479901459014688). Kako rezultati predikcije ukazuju na značajno smanjenje greške pozicioniranja izvršen je nastavak istraživanja u okviru kojeg je primenjena metodologija iz [4] na opsežnijem skupu podataka, koji obuhvata rezultate merenja sa više različitih lokacija u gradskom okruženju.

U drugoj sekciji rada objašnjena je metodologija istraživanja i sve faze koje su sprovedene u cilju predikcije greške pozicioniranja. Treća sekcija sadrži najznačajnije rezultate istraživanja, a u okviru treće sekcije izvršena je i validacija dobijenih rezultata. U okviru četvrte sekcije sumirani su rezultati istraživanja.

2. Metodologija

Kao što je već napomenuto, u okviru ovog istraživanja primenjena je metodologija iz [4], pri čemu su za predikciju greške pozicioniranja korišćeni isključivo podaci o elevaciji satelita. Za potrebe istraživanja izvršena su merenja i prikupljanje podataka sa 6 lokacija u urbanom okruženju. Nakon toga, usledila je priprema skupa podataka za prediktivnu analizu, statistička analiza i vizuelizacija podataka, za svaku lokaciju pojedinačno, a sprovedena je i sveobuhvatna analiza, koja uzima u obzir rezultate merenja sa svih lokacija. Nad kreiranim skupom podataka primenjeni su različiti modeli nadgledanog mašinskog učenja, u cilju rešavanja regresionog problema određivanja greške rastojanja i greške smera pozicioniranja.

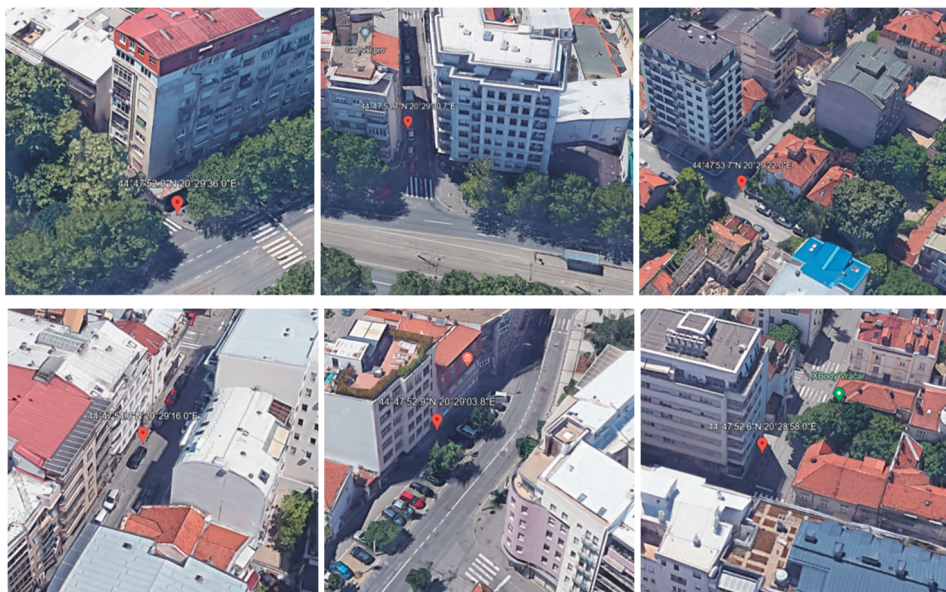
2.1. Faza merenja i prikupljanja podataka

Za merenje i prikupljanje podataka korišćena je *Google* aplikacija *GNSS logger*. Merenja su vršena na šest lokacija, pri čemu je svako merenje trajalo jedan minut, a pozicioniranje se vršilo svake sekunde. Većina merenja obavljena je na opštinama Vračar i Zvezdara u Beogradu. U Tabeli 1 dat je pregled koordinata lokacija na kojima su vršena merenja, kao i nazivi ulica.

Tabela 1. Pregled lokacija na kojima su vršena merenja

Lokacija	Geografska širina	Geografska dužina	Naziv ulice
Lokacija 1	44.79779	20.49333	Bulevar kralja Aleksandra
Lokacija 2	44.79826	20.49186	Bregalnička
Lokacija 3	44.79824	20.48945	Kajmakčalanska
Lokacija 4	44.79834	20.48778	Branka Krsmanovića
Lokacija 5	44.79802	20.48438	Vojvode Petka
Lokacija 6	44.79795	20.48279	Cara Nikolaja II

Na Slici 1 prikazane su lokacije na kojima su izvršena merenja. Kao što se može videti sa Slike 1, merenja su vršena u gradskom okruženju, a odabrane lokacije se međusobno razlikuju po pitanju objekata koji okružuju GNSS prijemnik, kao i po orijentaciji i širini ulice. Merenja su vršena dva puta dnevno u prepodnevnom i poslepodnevnom časovima tokom šest dana, tako da je na svakoj lokaciji izvršeno 12 merenja, odnosno ukupan broj merenja za potrebe istraživanja iznosi 72. Za merenja korišćen je telefon marke *Xiaomi 12 Pro*.



Slika 1. Lokacije na kojima su vršena merenja

2.2. Kreiranje skupa podataka za prediktivnu analizu

Rezultati pojediničnih merenja uskladišteni su u zasebne *.txt* dokumente. Prosečna veličina *.txt* dokumenata je 1.15MB. Izvršeno je spajanje *.txt* dokumenata za svaku lokaciju pojedinačno, nakon čega je izvršena priprema pojedinačnih skupova podataka u *Google Colaboratory* okruženju, korišćenjem programskog jezika *Python*. Priprema podataka obuhvatala je niz transformacija radi izdvajanja podataka od interesa u odgovarajućoj formi.

Prilikom merenja aplikacija *GNSS logger* beleži podatke o 67 atributa koji su raspoređeni u tri skupa podataka. U okviru ovog istraživanja, kao i u okviru [4], korišćeni su pojedini podaci iz prvog i drugog skupa podataka. Svaki *.txt* dokument sadrži zaglavlje u okviru kojeg su definisani parametri merenja. Na Slici 2 prikazano je zaglavlje prvog skupa podataka i jedna instanca tog skupa. Tokom svakog merenja beleži se tačno 60 instanci, jedna instanca svake sekunde. Na Slici 2 uokvireni su atributi i njima odgovarajući podaci koje je potrebno izdvojiti iz prvog skupa, a koji sadrže informacije o provajderu, geografskoj širini i dužini GNSS prijemnika i vremenu kada je izvršeno pozicioniranje.

```

Fix,Provider,LatitudeDegrees,LongitudeDegrees,AltitudeMeters,SpeedMps,AccuracyMeters,BearingDegrees,UnixTimeMillis,SpeedAccuracyMps,BearingAccuracyDegrees,elapsedRealtimeNanos,VerticalAccuracyMeters,MockLocation,NumberOfUsedSignals,VerticalSpeedAccuracyMps,SolutionType
Fix,GPS,44.7982665100,20.4894655500,207.89324951171875,0.0,3.929806,,1697462356418,0.0
29428551,,353497157977948,4.7337985,0,,,

```

Slika 2. Zaglavlje prvog skupa podataka i jedna instanca tog skupa

Drugi skup podataka sadrži informacije o satelitima. Zaglavlje i nekoliko instanci drugog skupa podataka prikazani su na Slici 3. Potrebno je naglasiti da jednoj instanci iz prvog skupa podataka odgovara veći broj instanci iz drugog skupa, zavisno od broja vidljivih satelita u trenutku kada je izvršeno merenje.

```

Status,UnixTimeMillis,SignalCount,SignalIndex,ConstellationType,Svid,CarrierFrequencyHz,Cn0DbHz,AzimuthDegrees,ElevationDegrees,UsedInFix,HasAlmanacData,HasEphemerisData,BasebandCn0DbHz
Status,1697462356418,72,0,1,5,1575420030,38.30,295.0,46.0,1,1,1,34.7
Status,1697462356418,72,1,1,7,1575420030,38.60,55.0,54.0,1,1,1,35.0
Status,1697462356418,72,2,1,8,1575420030,29.60,69.0,9.0,0,1,0,26.0
Status,1697462356418,72,3,1,9,1575420030,42.30,108.0,19.0,1,1,1,38.7
Status,1697462356418,72,4,1,13,1575420030,26.90,293.0,31.0,1,1,1,23.3

```

Slika 3. Zaglavlje drugog skupa podataka i nekoliko instanci tog skupa

Iz drugog skupa podataka izdvajaju se podaci o vremenu kada je izvršeno pozicioniranje, GNSS kojem pripada satelit, elevaciji satelita i podatak o tome da li je satelit korišćen prilikom pozicioniranja ili ne. Na osnovu prikazanih instanci, može se videti da svi sateliti pripadaju GPS (*Global Positioning System*) sistemu, kako vrednost atributa *ConstellationType* iznosi 1, kao i da su svi sateliti, sem satelita čija je elevacija 9°, korišćeni prilikom pozicioniranja. U okviru istraživanja razmatrani su isključivo rezultati kod kojih je pozicioniranje izvršeno od strane GPS sistema.

Prilikom predikcije koja je izvršena u [4] razmatrane su isključivo instance kod kojih je pozicioniranje izvršeno sa istim brojem satelita. U okviru ovog istraživanja, korišćen je drugačiji pristup, odnosno prediktivnim skupom obuhvaćene su sve instance bez obzira na broj satelita koji je korišćen prilikom pozicioniranja. Na ovaj način izbegnuta je eliminacija pojedinih instanci i smanjivanje dimenzija skupa za prediktivnu analizu. Takođe, analiziran je uticaj broja korišćenih satelita na tačnost prediktivnog modela.

Predviđeno je korišćene maksimalno 15 satelita prilikom pozicioniranja, odnosno predikcija se uvek vrši na osnovu podataka o elevaciji 15 satelita. U slučaju da je prilikom pozicioniranja korišćen manji broj satelita, *null* vrednosti zamenjene su 0, što odgovara elevaciji satelita od 0°.

Ciljne promenljive koje je potrebno predvideti su greška rastojanja u metrima i greška smera u stepenima. Heversine formula (1), korišćena je za proračun greške rastojanja, prema [5]:

$$d = 2 \cdot R \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \left(\varphi_2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \right) \right)} \quad (1)$$

gde je:

d – rastojanje između dve tačke na elipsoidu u metrima;

R – poluprečnik Zemlje, koji iznosi 6371000m;

φ_1 – geografska širina GNSS prijemnika dobijena pozicioniranjem;

φ_2 – tačna geografska širina GNSS prijemnika;

λ_1 – geografska dužina GNSS prijemnika dobijena pozicioniranjem;

λ_2 – tačna geografska dužina GNSS prijemnika.

Greška smera dređena je korišćenjem formule (2), prema [5]:

$$c = 2 \cdot \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}), \quad (2)$$

gde je a određeno relacijom (3):

$$a = \sin^2\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cdot \cos\left(\varphi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2}\right)\right). \quad (3)$$

Konačan skup podataka, koji je korišćen za prediktivnu analizu i koji obuhvata rezultate merenja sa svih lokacija, sadrži 3938 instanci.

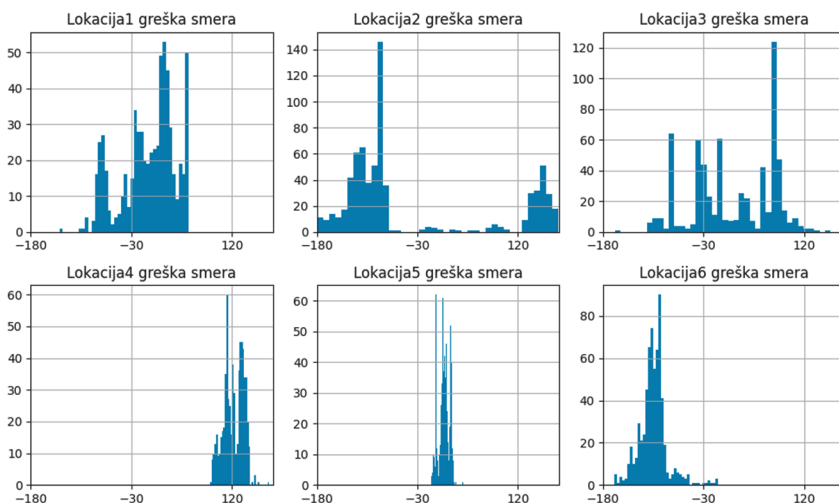
2.3. Istraživačka analiza kreiranog skupa podataka

Nakon kreiranja skupa podataka za prediktivnu analizu izvršena je istraživačka analiza ciljnih promenljivih za svaku lokaciju pojedinačno, a nakon toga analiza celokupnog skupa. U Tabeli 2 dat je pregled minimalne, maksimalne i prosečne greške rastojanja u metrima za pojedinačne lokacije.

Tabela 2. Pregled minimalne, maksimalne i prosečne greške rastojanja za pojedinačne lokacije

Lokacija	Min greška rastojanja [m]	Max greška rastojanja [m]	Prosečna greška rastojanja [m]
Lokacija 1	0.145055	24.238300	8.221410
Lokacija 2	0.338031	11.572124	5.351545
Lokacija 3	0.364507	8.628568	3.483915
Lokacija 4	6.166651	22.058529	13.797677
Lokacija 5	5.842309	35.386863	27.311740
Lokacija 6	2.054824	19.675162	9.552090

Iz Tabele 2 se mogu uočiti veće vrednosti prosečne greške rastojanja, na lokacijama 4 i 5, u poređenju sa ostalim lokacijama. Lokacije 4 i 5 najviše odgovaraju uslovima uličnog kanjona (Slika 1), pri čemu je GNSS prijemnik zaklonjen visokim zgradama. Potrebno je napomenuti da su merenja na lokacijama 4 i 5 izvršena u ulicama Branka Krsmanovića i Vojvode Petka, koje su uže ulice sa dve saobraćajne trake. Sa druge strane, merenja na lokacijama 1 i 2 izvršena su na raskrsnicama dveju ulica i ulice Bulevar kralja Aleksandra, koja sadrži 4 saobraćajne trake, kao i tramvajске šine između saobraćajnih traka. Najmanja prosečna greška rastojanja zabeležena je u slučaju lokacije 3. Sa Slike 1 se može videti da je u slučaju lokacije 3, GNSS prijemnik sa više strana okružen niskim kućama. Raspodela greške smera za različite lokacije prikazana je na Slici 4.



Slika 4. Raspodela greške smera za pojedinačne lokacije

Za grafički prikaz raspodele greške smera korišćen je histogram, koji omogućava prikaz distribucije frekvencije kvantitativne promenljive. Sa Slike 4 se može uočiti da je u slučaju lokacija 4 i 5, kod kojih je zabeležena najveća prosečna greška rastojanja, greška smera skoncentrisana u užem opsegu vrednosti, oko 120° , odnosno -40° . Sa druge strane za lokacije 2 i 3, kod kojih je zabeležena najmanja prosečna greška rastojanja, greška smera je neuniformno raspoređena na celokupnom opsegu, pogotovo kod lokacije 3.

Prosečna greška rastojanja za sve lokacije iznosi 13.84m. Na Slici 5 prikazana je raspodela greške smera za sve lokacije.



Slika 5. Raspodela greške smera za sve lokacije

3. Rezultati i analiza rezultata

U okviru rada razmatran je regresioni problem predikcije greške rastojanja i greške smera na osnovu podataka o elevaciji satelita. Za ocenu i validaciju obučanih

modela korišćena je RMSE (*Root Mean Squared Error*), koja se pored MAE (*Mean Absolute Error*) i MSE (*Mean Squared Error*) najčešće koristi kao metrika za ocenu regresionih modela mašinskog učenja [6]. RMSE ukazuje na razliku između stvarne i prediktovane vrednosti i jednostavan je za interpretaciju jer uzima vrednosti ciljne promenljive [6]. Za proračun RMSE korišćena je formula (4), gde je y_i tačna vrednost, \hat{y}_i vrednost dobijena predikcijom, a n broj opservacija [6].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

Kao ocena performansi kod regresionih modela često se koristi i koeficijent determinacije, R^2 , čija se vrednost nalazi u opsegu od 0 do 1, pri čemu se vrednosti bliske jedinici smatraju odličnim. Koeficijent determinacije predstavlja udeo varijanse ciljne promenljive koji je objašnjen tim modelom [7]. Koeficijent determinacije zapravo ukazuje na to koliko su promene jedne promenljive prouzrokovane promenama druge promenljive [7].

Koeficijent determinacije korišćen je za ocenu performansi modela u slučaju predikcije greške rastojanja i greške smera, dok je RMSE korišćen isključivo u slučaju greške rastojanja, zbog jednostavne interpretacije rezultata.

Prvo je sproveden proces mašinskog učenja za svaku lokaciju pojedinačno, kako bi se ispitao uticaj korišćenja različitog broja satelita prilikom pozicioniranja, koji nije razmatran u [4]. Izvršena je podela podataka na skup za treniranje – 70% instanci, i skup za testiranje – 30% instanci. Trenirana su tri modela mašinskog učenja: *DecisionTree*, *RandomForest* i *GradientBoosting*, pomoću kojih su dobijeni najbolji rezultati u okviru istraživanja [4]. U Tabeli 3 sumirani su rezultati treniranja navedenih modela za ciljnu promenljivu greška rastojanja, a u Tabeli 4 za ciljnu promenljivu greška smera.

Tabela 3. Rezultati validacije za ciljnu promenljivu greška rastojanja za pojedinačne lokacije

Lokacija	DecisionTree		RandomForest		GradientBoosting	
	R^2	RMSE [m]	R^2	RMSE [m]	R^2	RMSE [m]
Lokacija 1	0.9473	1.1848	0.9396	1.2674	0.9205	1.4549
Lokacija 2	0.9997	0.9943	0.9973	2.6833	0.9996	1.0072
Lokacija 3	0.8495	0.6676	0.8505	0.6653	0.8237	0.7225
Lokacija 4	0.8497	1.4379	0.8705	1.3347	0.8499	1.4367
Lokacija 5	0.9168	2.3156	0.9729	1.3195	0.9713	1.3589
Lokacija 6	0.8093	1.2632	0.8145	1.2456	0.8084	1.2658

Tabela 4. Rezultati validacije za ciljnu promenljivu greška smera za pojedinačne lokacije

Lokacija	DecisionTree	RandomForest	GradientBoosting
	R^2	R^2	R^2
Lokacija 1	0.8381	0.8358	0.8047
Lokacija 2	0.9194	0.9338	0.9113
Lokacija 3	0.8842	0.8842	0.8831
Lokacija 4	0.8815	0.9091	0.8983
Lokacija 5	0.9190	0.9349	0.9330
Lokacija 6	0.8932	0.7835	0.7510

Iz Tabele 3 i 4 se može uočiti da su najbolji rezultati, u slučaju greške rastojanja i greške smera, dobijeni korišćenjem *RandomForest* i *DecisionTree* modela mašinskog učenja. Kod greške smera dobijene su veće vrednosti koeficijenta determinacije primenom *RandomForest* modela. Koeficijent determinacije, za grešku rastojanja, za sve lokacije u slučaju *RandomForest* modela, nalazi se u opsegu od 0.8145 do 0.9973, odnosno od 0.7835 do 0.9349 u slučaju greške smera. U slučaju lokacije 5, kod koje je zabeležena najveća prosečna greška rastojanja, koeficijent determinacije iznosi 0.9729, dok RMSE ukazuje na razliku predviđenih i stvarnih vrednosti greške rastojanja od 1.32m. Za lokaciju 5, dobijena je visoka vrednost koeficijenta determinacije, 0.9349, i u slučaju predikcije smera greške. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se kreirani model mašinskog učenja može koristiti za predikciju greške rastojanja i greške smera i u slučaju korišćenja različitog broja satelita prilikom predikcije.

Nakon treniranja modela nad pojedinačnim skupovima podataka, primenjen je isti pristup i na celokupnom skupu podataka. Rezultati validacije, za različite modele mašinskog učenja, prikazani su u Tabeli 5. Iz priloženog se može videti da su najbolji rezultati za ciljnu promenljivu greška rastojanja dobijeni primenom *DecisionTree* i *RandomForest* modela, dok je po pitanju greške smera najbolji rezultat dobijen primenom *RandomForest* modela. Dobijeni rezultati ukazuju na to da se kreirani model može primeniti za predikciju greške pozicioniranja i u slučaju većeg broja različitih lokacija istovremeno.

Tabela 5. Rezultati validacije celokupnog skupa podataka

Model mašinskog učenja	Greška rastojanja		Greška smera
	R ²	RMSE [m]	R ²
DecisionTree	0.9781	2.6586	0.8868
RandomForest	0.9764	2.7606	0.9080
GradientBoosting	0.9419	5.7017	0.7213

Radi dodatne validacije kreiranog modela rezultati predikcije, dobijeni primenom *RandomForest* modela, iskorišćeni su za korekciju koordinata GNSS prijemnika. Korekcija je izvršena nad skupom podataka koji je korišćen za testiranje modela i koji sadrži 788 instanci. Nakon toga izvršeno je kreiranje šest poligona u neposrednoj blizini lokacija na kojima su vršena merenja. Poligoni su kreirani primenom *Python* biblioteke *geopandas*, koja omogućava jednostavan rad sa geoprostornim podacima. Na Slici 6 dat je grafički prikaz kreiranih poligona.

Nakon kreiranja poligona određen je broj tačaka unutar i van poligona, pre i nakon korekcija koordinata GNSS prijemnika. Rezultati su prikazani u Tabeli 6. Iz Tabele 6 se može uočiti značajno povećanje broja tačaka, detektovanih u poligonu, nakon korekcija koordinata GNSS prijemnika. Npr. ukoliko posmatramo lokaciju 5, kod koje je zabeležena najveća prosečna greška rastojanja, možemo uočiti da se svega 13 tačaka nalazi u kreiranom poligonu, dok je nakon korekcija koordinata u poligonu detektovano čak 107 tačaka. Za lokaciju 4, kod koje je takođe zabeležena velika vrednost prosečne greške rastojanja, može se videti da je pre korekcija u poligonu detektovana samo jedna tačka, dok je nakon korekcija detektovano 57 tačaka. Takođe, može se uočiti da u slučaju lokacije 1, nakon korekcija koordinata, samo tri tačke nisu detektovane u okviru poligona, dok je broj tačaka van poligona pre korekcija iznosio 123.



Slika 6. Poligoni koji su korišćeni za validaciju modela

Tabela 6. Pregled broja tačaka detektovanih u okviru definisanih poligona pre i nakon korekcija koordinata GNSS prijemnika.

Lokacija	Broj tačaka u poligonu pre korekcija	Broj tačaka u poligonu nakon korekcije	Ukupan broj tačaka
Lokacija 1	24	144	147
Lokacija 2	44	95	139
Lokacija 3	10	82	127
Lokacija 4	1	57	128
Lokacija 5	13	107	123
Lokacija 6	16	38	124

Posmatrajući sve lokacije, broj tačaka koji je detektovan unutar kreiranih poligona pre korekcija iznosi 108, dok su nakon korekcija u poligonima detektovane 523 tačke. Na ovaj način broj tačaka van poligona smanjen je sa 680 na 265.

4. Zaključak

U okviru ovog rada nastavljeno je istraživanje u cilju povećanja preciznosti pozicioniranja, u urbanoj sredini, primenom nadgledanog mašinskog učenja. Izvršena je predikcija greške rastojanja i greške smera na osnovu podataka o elevaciji satelita. Prilikom prediktivne analize korišćeni su rezultati merenja sa većeg broja lokacija u gradskom okruženju, pri čemu je za pozicioniranje korišćeno između 7 i 15 satelita GPS sistema.

Na osnovu rezultata istraživanja može se videti potencijal primene mašinskog učenja za smanjenje greške pozicioniranja GNSS. Najbolji rezultati predikcije greške

rastojanja i greške smera dobijeni su primenom *DecisionTree* i *RandomForest* modela. Dobijeni rezultati iskorišteni su za korekciju koordinata GNSS prijemnika, čime je obezbeđena značajno veća preciznost pozicioniranja.

Literatura

- [1] J. Paziewski, "Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations", *Measurement Science and Technology* 31.9, 2020: 091001. DOI: 10.1088/1361-6501/ab8a7d.
- [2] M. Đogatović, V. Radonjić Đogatović, "Principi i razvoj aplikacija za lokacijske servise", *XXXV Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – PosTel 2017*, Beograd, 5. i 6. decembar 2017. Zbornik radova, str. 201-210, ISBN: 978-86-7395-384-7.
- [3] P. J.G. Teunissen, O. Montenbruck, *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer, Cham, 2017.
- [4] I. Stefanović, A. Uzelac, S. Janković, S. Mladenović, "Povećanje preciznosti GPS pozicioniranja u urbanoj sredini primenom mašinskog učenja", *SYM-OP-IS 23, L Međunarodni simpozijum o operacionim istraživanjima*, Tara, 18-21. septembar 2023. Zbornik radova, str. 167-172, ISBN 978-86-335-0836-0.
- [5] D. Hurgoiu, V. Tompa, C. Neamțu, D. Popescu, "Low-cost GPS navigation for NXT-based robots", *Quality - Access to Success*, 13.5, pp. 371-374, 2012.
- [6] S. Ozdemir, *Principles of data science*. Packt Publishing Ltd, 2016.
- [7] D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman, "The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation", *PeerJ Computer Science*, 7, 2021, DOI: 10.7717/peerj-cs.623.

Abstract: *Global navigation satellite systems (GNSS) are becoming an essential component of daily life as a result of the rapid expansion of location services. In this paper, machine learning regression models are used to further research on improving the location accuracy of global navigation satellite systems in urban environments. As part of the study, satellite elevation data were used to predict the distance error and direction error. The data collection, which was used for research analysis, had been created using extensive results from measurements made at various locations within the city environment. The findings of the developed prediction model allow us to draw the conclusion that the satellite elevation data can be utilized to forecast positioning error and correct the coordinates of the GNSS receiver.*

Keywords: *positioning error, prediction, machine learning, regression, GNSS*

APPLICATION OF REGRESSION MODELS FOR THE PREDICTION OF GNSS POSITIONING ERROR

Ivana Stefanović, Snežana Mladenović, Slađana Janković, Ana Uzelac

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.021>

IoT REŠENJE ZA POŠTANSKO SANDUČE SA AUTOMATSKOM DOJAVOM PRIJEMA POŠILJKI

Nikola Milutinović¹, Zlatica Marinković², Zoran Stanković², Vera Marković²

¹Univerzitet u Nišu – Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija - odsek Niš,
nikola.milutinovic@akademijanis.edu.rs

²Univerzitet u Nišu - Elektronski fakultet, zlatica.marinkovic@elfak.ni.ac.rs,
zoran.stankovic@elfak.ni.ac.rs, vera5556@gmail.com

Sadržaj: *Uvođenje IoT tehnologija u različite aspekte svakodnevnog života i industrijskog sektora predstavlja značajan korak u razvoju pametnih i efikasnih rešenja. U ovom radu najpre je dat kratak pregled trenutnih rešenja primene IoT tehnologija za automatsku dojavu prispeća pošiljki u poštansko sanduče. Analizirane su osnovne komponente ovih sistema, tehnološki izazovi i prednosti, kao i potencijalne komercijalne primene. Zatim je predloženo novo rešenje koje omogućava prevazilaženje nekih nedostataka ili ograničenja koji postoje kod trenutnih rešenja, a pre svega u pogledu napajanja u ekstremnim ambijentalnim uslovima uz korišćenje izvora obnovljive energije.*

Ključne reči: *IoT, senzori, poštansko sanduče, GSM*

1. Uvod

S obzirom na ubrzan način života i poslovanja koji karakteriše današnje društvo, potreba za efikasnim i tačnim obaveštavanjem o događajima u svakodnevnom životu postaje sve važnija. Automatska dojava o prispeću pošiljki predstavlja jedan od odgovora na ovu potrebu, pružajući korisnicima mogućnost da brzo i precizno saznaju kada je pismo primljeno, bez potrebe za manuelnim pregledom poštanskog sandučeta. Ovo je posebno značajno za poslovne organizacije koje često primaju značajan obim poslovne korespondencije, kao i za korisnike koji imaju poštansko sanduče na posedu na lokaciji udaljenoj od lokacije prebivališta. Ovakvi sistemi omogućavaju korisnicima da budu informisani o prispeću pošte u realnom vremenu, što je od suštinskog značaja za organizacije koje teže boljoj interakciji sa svojim klijentima, kao i za pojedince koji žele da efikasno upravljaju svojim ličnim i poslovnim obavezama.

Današnji pametni uređaji predstavljaju kompleksnu kombinaciju različitih komponenata, čineći ih funkcionalnim i korisnim za krajnje korisnike. Tržište nudi raznolike hardverske komponente koje omogućavaju krajnjim korisnicima da bolje organizuju svoje vreme, olakšaju svakodnevne zadatke i ostvare efikasniju upotrebu svojih uređaja. Virtuelni asistenti, pametni kućni uređaji, *smart house* rešenja i mnogi

drugi pametni uređaji predstavljaju samo deo IoT (*Internet of Things*) ekosistema koji kontinuirano evoluira kako bi unapredio živote ljudi i olakšao svakodnevne aktivnosti. Ovi uređaji su dizajnirani da komuniciraju međusobno i sa centralnim sistemima putem različitih komunikacionih protokola.

Ovaj rad se bavi IoT rešenjima za poštansko sanduče sa automatskom dojavom pošiljki. Razvoj ovakvih sistema je veoma kompleksan jer je neophodno sagledati mnoštvo prepreka koje se mogu pojaviti prilikom instalacije sistema u poštansko sanduče. Do sada su predstavljena različita inovativna tehnička rešenja, od čega su neka komercijalizovana i dostupna na tržištu. Svako od postojećih tehnoloških rešenja nosi sa sobom svoje specifične ograničavajuće faktore u različitim ključnim aspektima. Značajna ograničenja mogu se primetiti u kontekstu dimenzija, namenske proizvodnje za samo određeni tip poštanskog sandučeta (uglavnom za američko tržište), nestabilne veze sa Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) mrežom zbog udaljenosti poštanskog sandučeta, osetljivosti na spoljne faktore i temperaturu okoline, zloupotrebe sistema u slučaju otvaranja vrata poštanskog sandučeta nenamenski.

U ovom radu predlaže se rešenje koje može odgovoriti na zahteve koji su definisani na osnovu kritičnih problema u razvoju prethodnih inovativnih rešenja. Predloženo rešenje zbog malih dimenzija ima mogućnost instalacije senzora unutar bilo kog poštanskog sandučeta, pouzdanost detekcije je velika, obaveštavanje korisnika je putem SMS poruke, nije potrebna pokrivenost Wi-Fi signalom na lokaciji sandučeta, sprečena je zloupotreba sistema čime je nivo privatnosti korisnika podignut na viši nivo.

U radu je u Sekciji 2 je ukratko prikazan pregled trenutnih IoT rešenja sa automatskim javljanjem o primljenoj pošti, opisana su najčešće primenjena rešenja i njihove karakteristike. Zatim je u Sekciji 3 predstavljeno novo idejno rešenje za poštansko sanduče sa automatskom dojavom o prispelim pošiljkama, gde je prikazana blok šema i princip rada sistema. U Sekciji 4 su opisane komponente sistema i predstavljen je izgled realizovanog prototipa. Sekcija 5 sadrži rezultate testiranja prototipa i diskusiju rezultata. Kratak zaključak je dat u Sekciji 6 i praćen je listom korišćene literature.

2. Pregled trenutnih rešenja za dojavu prijema pošiljki

Izvestan broj tehnoloških rešenja za dojavu prispeća pošiljki primenjen je uz upotrebu PIR (*Passive Infrared*) senzora. Kod ovakvih rešenja mogućnost detekcije je putem PIR senzora koji se ugrađuje u samu unutrašnjost sandučeta i povezuje se sa modulom za komunikaciju koji može sadržati u sebi Wi-Fi modul ili GSM (*Global System for Mobile Communications*) modul za slanje obaveštenja krajnjem korisniku. Veći broj rešenja realizovan je sa ovim senzorima, a primer takvog rešenja prikazan je u [1], [2]. Neka od rešenja nude kombinaciju PIR senzora sa *Raspberry Pi* mikroračunarom koji na svom hardveru ima određena softverska rešenja za procesiranje signala primljenog od senzora i slanje informacije krajnjem korisniku putem Wi-Fi mreže [3].

Neka od naprednijih rešenja realizovana su pomoću programabilnih logičkih kontrolera (PLC - *Programmable Logic Controller*) opremljenih različitim vrstama senzora, uglavnom senzorima pokreta koji detektuju promene unutar poštanskog sandučeta nakon što je pošiljka isporučena. Senzori su povezani sa kontrolnom jedinicom za detekciju, koja signalizira prisustvo nove pošte. Ovakvi uređaji direktno se integrišu

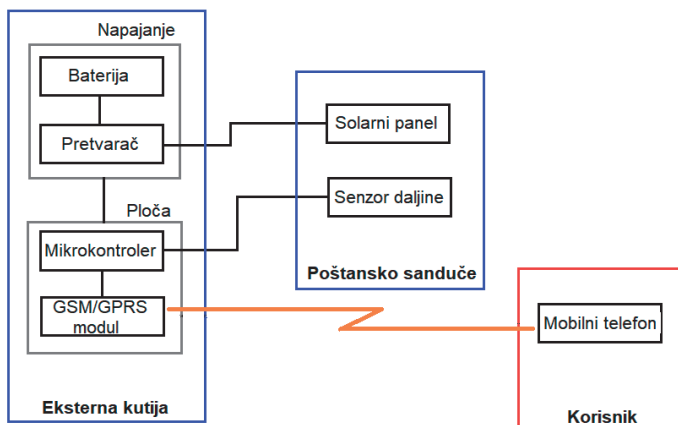
na poštansko sanduče, omogućavajući precizno praćenje prispeća pošte. Posebno vredan aspekt ovih uređaja je njihova sposobnost slanja SMS poruka ili elektronske pošte putem GSM modula [4].

Detekcija pristiglih pošiljki na osnovu detekcije pomeraja vratanca poštanskog sandučeta predstavlja još jedno inovativno rešenje koje koristi različite tipove senzora, kao što su: akcelometar, žiroskop i magnetometar. Bazirani su na instalaciji senzora na samim vratima poštanskog sandučeta pri čemu se detektuje pomeraj i vrednost signala dobijenog od senzora se upoređuje sa unapred definisanim pragom. Ukoliko postoji razlika, putem elektronske pošte se obaveštava korisnik o pristigloj pošti [5]. Pomoću vibracionih senzora takođe je moguće dobiti informaciju o pomeraju vratanca poštanskog sandučeta. Kada nosilac pisma zatvori poklopac poštanskog sandučeta nakon što ostavi pismo, senzor detektuje ovu vibraciju. Nakon toga, šalje informaciju koja se dalje obrađuje u mikrokontroleru i preko određenih modula za bežičnu komunikaciju šalje do krajnjeg korisnika. Instalacija ovakvog senzora ne mora nužno biti direktno na poštanskom sandučetu, ali proces mora biti precizno izbalansiran kako bi poštansko sanduče reagovalo samo na značajne vibracije, a ne na manje vibracije, kao što su one koje dolaze od vetra, što predstavlja jednu od slabosti ovakvih sistema [6]. Jedno rešenje nudi instalaciju piezoelektričnih senzora na samom dnu sandučeta koji detektuju promenu težine za svaki objekat koji upadne u sanduče [7].

3. Predloženo IoT rešenje za poštansko sanduče sa automatskom dojavom prijema pošiljki

Sagledavanjem svih problema i ograničenja koja postoje sa do sada razvijenim sistemima, predloženo je novo IoT rešenje za poštansko sanduče sa automatskom dojavom prijema pošiljki koje ima mogućnost obaveštavanja krajnjeg korisnika putem SMS poruke kada se pošta dostavi u posmatrano sanduče. Ovo rešenje ima mogućnost javljanja u realnom vremenu i pruža viši nivo privatnosti korisnika i bezbednosti pošiljke koja je isporučena. Glavna karakteristika ovog rešenja je mogućnost primene na bilo kom tipu poštanskog sandučeta (evropski ili američki standard).

Blok šema sa elementima sistema prikazana je na Slici 1.



Slika 1. Blok šema sistema

Sistem se sastoji od poštanskog sandučeta sa integrisanim senzorom daljine i dodatnim hardverom. Ovaj senzor je povezan sa ostalim hardverskim komponentama smeštenim unutar spoljne kutije koja je pričvršćena na poštansko sanduče. U spoljnoj kutiji nalazi se ploča sa elektronskim komponentama, uključujući GSM modul namenjen za slanje SMS poruka korisnicima i napajanje realizovano punjivom baterijom sa naponom od 3.6 V. Baterija se dopunjuje putem solarnog panela koji je montiran na površini poštanskog sandučeta. Ovo omogućava uređaju potpunu mobilnost i nezavisnost od eksternog električnog napajanja, čime se postiže energetska efikasnost i ekološka prihvatljivost.

Mikrokontroler je u sistemu konfigurisan tako da periodično, svakih 2000 ms, vrši proveru stanja senzora. Konkretno, on daje komandu senzoru da izmeri distancu unutar poštanskog sandučeta. U slučaju da se u bilo kom trenutku zabeleži odstupanje distance od referentne vrednosti, taj podatak se evidentira, a mikrokontroler naknadno upotrebljava GSM/GPRS modul za slanje SMS obaveštenja krajnjem korisniku.

Definisana su tri osnovna stanja:

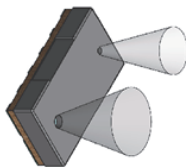
- Otvorena vrata sandučeta: Ovo stanje nastupa kada je distanca veća od referentne daljine određene kada je sanduče zatvoreno. Tada se krajnjem korisniku šalje SMS poruka sa sadržajem „Sanduče otvoreno“. Ovo je inicijalno stanje.
- Zatvorena vrata sandučeta: Nakon što se vrata poštanskog sandučeta zatvore, senzor meri distancu koja ostaje konstantna duži vremenski period i uzima je kao referentnu. Nakon toga korisniku se šalje SMS poruka sa tekstom „Sanduče zatvoreno“.
- Primljena pošta: Ukoliko dođe do smanjenja distance u odnosu na referentnu daljinu, šalje se poruka sa sadržajem „Stigla je pošta“. Nakon otvaranja vrata i merenja veće distance od one definisane u kodu, dolazi do resetovanja stanja i očekuje se zatvaranje vrata sandučeta i određivanje nove referentne vrednosti.

4. Realizacija prototipa

U nastavku je dat kratak opis komponenta koje su korišćene za realizaciju sistema:

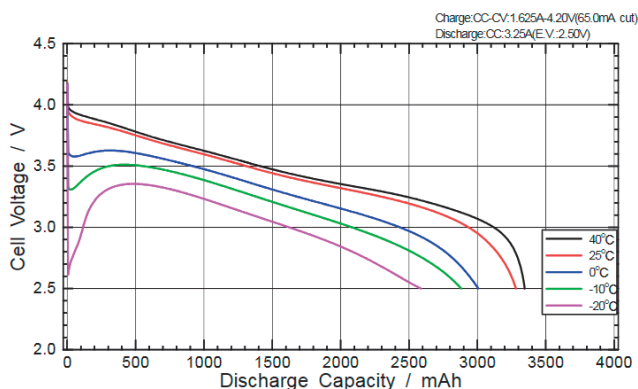
- Mikrokontroler STM32G070 baziran je na visoko performansnom 32-bitnom RISC jezgri Arm Cortex-M0+ sa radnom frekvencijom koja ide do 64 MHz. Ističe se visokim stepenom integracije i može se primeniti u širokom spektru aplikacija u potrošačkom sektoru, industriji i uređajima, a takođe je pripremljen za rešenja u okviru IoT. Dolazi sa nizom unapređenja, uključujući jedinicu za zaštitu memorije (MPU – *Memory Protection Unit*), brzu ugrađenu memoriju, DMA (*Direct Memory Access*) i različite sistemske funkcije. Radna temperatura ovih uređaja varira od -40°C do 85°C, a radni napon napajanja se kreće u opsegu od 2.0 V do 3.6 V. Zbog optimizovane dinamičke potrošnje i obimnog seta režima za uštedu energije, ovi mikrokontroleri su veoma pogodni za projektovanje aplikacija sa malom potrošnjom energije [8].
- Senzor daljine VL53L0K je kompaktan laserski ToF (*Time-Of-Flight*) senzor koji se ističe kao najmanji paket dostupan na tržištu (Slika 2). Ovaj modul pruža precizna merenja udaljenosti bez obzira na svojstva površine koja se meri, što

predstavlja napredak u odnosu na tradicionalne metode. Ima sposobnost merenja apsolutnih udaljenosti do 2 metra. Ključna karakteristika ovog modula je integracija niza jednofotonskih lavinskih dioda (SPAD - *Single Photon Avalanche Diodes*) i primena druge generacije *FlightSense* patentirane tehnologije. Modul koristi laserski izvor svetlosti talasne dužine 940 nm. Takođe, poseduje unutrašnje fizičke infracrvene filtre koji omogućavaju veće udaljenosti merenja, povećanu otpornost na ambijentalno osvetljenje i veću pouzdanost u očitavanju površina koje reflektuju svetlost, uključujući i staklene površine [9].



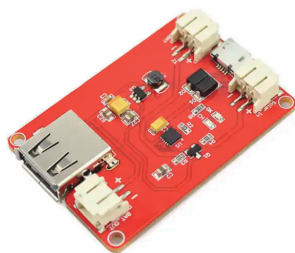
Slika 2. Izgled senzora daljine [9]

- Za slanje SMS poruka krajnjem korisniku koristi se GSM modul Quectel M66FA-04-STD. Ovaj modul predstavlja izuzetno kompaktan četvoropojasni GSM/GRPS modul sa LCC kastelacionim pakovanjem. Baziran na 2G čipsetu, ovaj modul pruža optimalne performanse u prenosu SMS poruka, podataka i audio usluga čak i u zahtevnim uslovima. Koristi tehnologiju površinske montaže, čime se garantuje njegova robusnost i pouzdanost, a niska profiliranost i mali paket omogućavaju jednostavnu integraciju u aplikacije sa ograničenim dimenzijama. Kompaktna veličina, niska potrošnja energije i izdržljivost na temperature čine ovaj modul izuzetno pogodnim izborom za različite primene u domenu M2M (*Machine to Machine*) komunikacija, kao što su nosivi uređaji, industrijski PDA (*Personal Digital Assistant*) uređaji i mnoge druge oblasti [10].
- Izvor napajanja koji se koristi u sistemu je punjiva baterija PANASONIC NCR18650B sa nominalnim naponom od 3.6 V i nominalnom kapacitivnošću od 3350 mAh. Karakteristika pražnjenja baterije u zavisnosti od spoljašnje temperature prikazana je na Slici 3.



Slika 3. Karakteristika brzine pražnjenja zavisno od temperature [11]

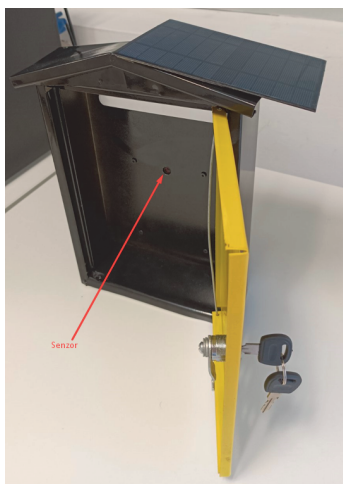
Baterija je direktno povezana sa modulom Mini Solar Lipo Charger, prikazanom na Slici 4. Ovaj modul ima dva nezavisna ulaza: jedan za bateriju, jedan za solarni panel. Pored ovoga, ima mogućnost punjenja preko adaptera, povezivanjem na direktan izvor struje, ili preko USB napajanja. Izlaz ovog modula povezuje se sa glavnom pločom. Čip koji koristi ovaj modul, CN3065, je specijalizovan za upravljanje punjenjem litijumskih baterija. Kada je dostupno eksterno napajanje za litijumske baterije, ovaj čip se može koristiti i kao izvor stabilne struje od 5 V i 500 mA [12].



Slika 4. Mini Solar Lipo Charger Board CN3065 [12]

- Solarni panel dimenzija 150 x 130 mm, koji je namontiran na samo kućište sandučeta sa gornje strane, povezan je sa Mini Solar Lipo Charger modulom. Solarni panel daje napon od 5 V i struju od 500 mA, služi za napajanje baterije, čime je omogućen duži životni vek baterije.

Na Slici 5 prikazane su fotografije realizovanog prototipa predloženog IoT rešenja za poštansko sanduče sa automatskom dojavom prijema pošiljki. U unutrašnjosti sandučeta nalazi se senzor daljine instaliran tako da ne zauzima prostor u sandučetu, a ostatak hardvera je u spoljnoj kutiji.



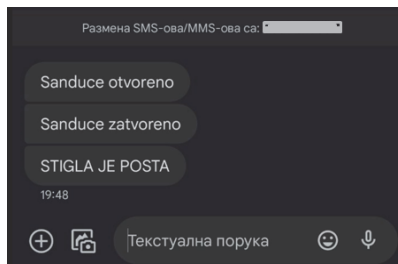
(a)



(b)

Slika 5. Izgled (a)prednje i (b) zadnje strane realizovanog prototipa

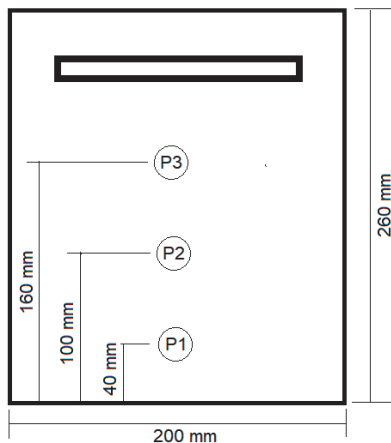
Ilustracija SMS obaveštenja, nakon određene akcije na poštanskom sandučetu, prikazana je na Slici 6.



Slika 6. Ilustracija primljenih obaveštenja o aktivnostima na poštanskom sandučetu

5. Ispitivanje performansi sistema

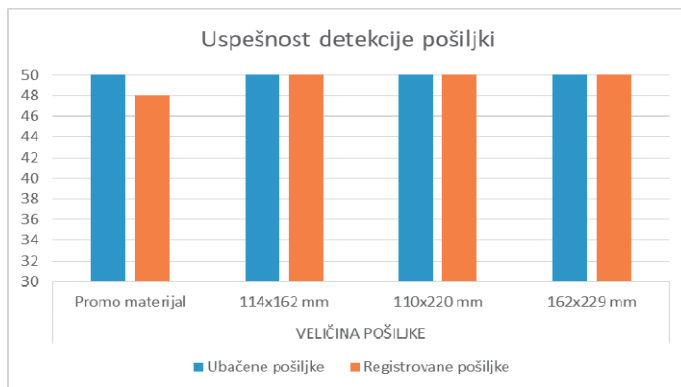
Pouzdanost i tačnost sistema zavisi od načina korišćenja poštanskog sandučeta, dimenzija pošiljke i od pozicije senzora daljine unutar sandučeta. U fazi ispitivanja performansi sprovedeno je ispitivanje tačnosti detekcije prijema pošiljke za 3 različite pozicije senzora po vertikali (40 mm, 100 mm i 160 mm od dna sandučeta), a horizontalno je zadržana srednja pozicija na zadnjem zidu poštanskog sandučeta. Razmatrane pozicije prikazane su na Slici 7.



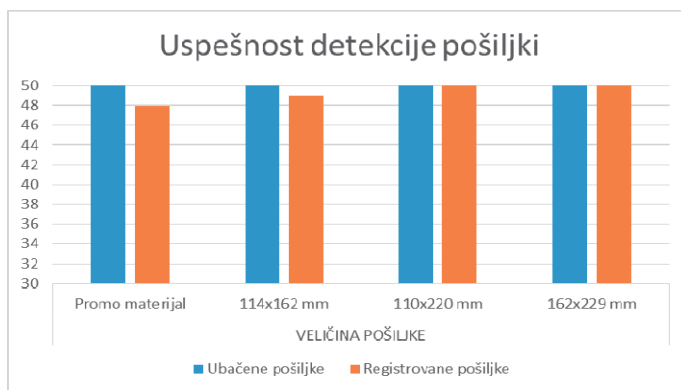
Slika 7. Pozicioniranje senzora u sandučetu u fazi testiranja

Za testiranje sistema korišćene su različite veličine pošiljki. Kao promo materijal korišćeni su različiti tipovi lifleta koji se razlikuju po dimenziji, vrsti papira i debljini papira. Najslabije se pokazala detekcija pošiljke poput listića za glasanje zato što se može saviti i preklopiti zbog mekoće papira. Korišćene su i koverta dimenzija 114 × 162 mm, 110 × 220 mm i 162 × 229 mm. U svakoj od razmatranih pozicija eksperiment je ponovljen po 50 puta sa svim navedenim vrstama pošiljki. Rezultati uspešnosti

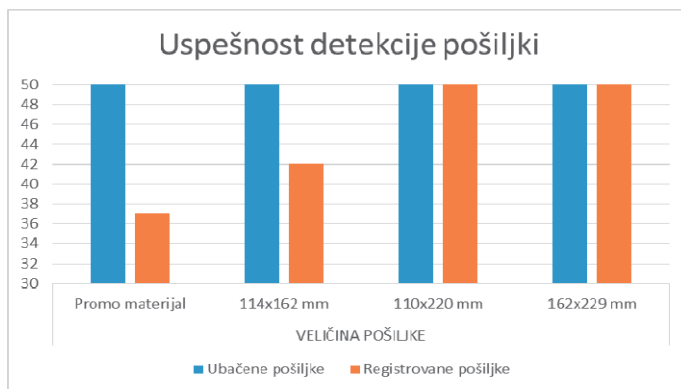
detekcije su grafički prikazani na Slikama 8, 9 i 10 za pozicije senzora P1, P2 i P3, respektivno.



Slika 8. Uspešnost detekcije pošiljki za poziciju senzora na 40 mm od dna sandučeta – pozicija P1



Slika 9. Uspešnost detekcije pošiljki za poziciju senzora na 100mm od dna sandučeta – pozicija P2



Slika 10. Uspešnost detekcije pošiljki za poziciju senzora na 160mm od dna sandučeta – pozicija P3

Na osnovu prikazanih rezultata se može videti da predloženo rešenje ima visoku uspešnost detekcije različitih tipova pošiljki. Za kovertu dimenzija 110×220 mm i 162×229 mm detekcija je uvek bila uspešna, bez obzira na poziciju senzora. Uspešnost detekcije najmanje kovertu, dimenzija 114×162 mm, je stoprocentna za slučaj najniže pozicije senzora P1, a smanjuje se sa povećanjem visine postavljanja senzora. U slučaju lifleta uzorci pošiljki su raznorodni po dimenzijama, uključujući i nestandardne manjih dimenzija od najmanje razmatrane kovertu, tačnost detekcije je nešto manja nego kod kovertu i raste sa smanjenjem visine postavljanja senzora. Dakle, može se zaključiti da iako je najveća preciznost postignuta za pozicioniranje senzora na najmanju visinu od 40 mm od dna sandučeta, i postavljanje senzora na visinu od 100 mm dovodi do minimalnog smanjenja tačnosti.

5. Zaključak

IoT rešenja za detekciju pristigle pošte u poštanskim sandučićima mogu imati široku primenu u različitim sektorima, uključujući privatne domove, poslovne objekte, stambene zgrade i druge lokacije. Pored toga, ovakva tehnologija može doprineti smanjenju rizika od gubitka ili krađe pošiljaka, čime se unapređuje bezbednost pošiljki. Rešenje koje je prikazano u ovom radu adaptivno je na sve tipove poštanskih sandučića, radi u realnom vremenu, ima mogućnost zaštite pošiljki od krađe jer detektuje otvaranje vrata, koristi obnovljivi izvor energije za punjenje baterije i ne zahteva dodatnu mrežnu infrastrukturu za povezivanje i slanje poruka. Ovo rešenje se može dalje unapređivati i prilagođavati potrebama korisnika, čime se otvaraju vrata za nove inovacije u oblasti dostave pošiljki.

Zahvalnica: Istraživanja prikazana u ovom radu podržana su od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (br. 451-03-47/2023-01/200102). Razvoj ovog sistema podržan je od strane Akademije tehničko-vaspitačkih strukovnih studija – odsek Niš.

Literatura

- [1] „Ring’s Mailbox Sensor is one of the nerdier smart home gadgets I’ve tested“, <https://www.theverge.com/22193709/ring-mailbox-sensor-review>
- [2] Ring Mailbox Sensor, <https://ring.com/products/ring-mailbox-sensor>
- [3] Kishore K.S., „Smart Mailbox Using Raspberry Pi“, University College of Engineering, Nagercoil, Tamilnadu, India, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, Volume 9, 2021, <https://www.ijraset.com/best-journal/smart-mailbox-using-raspberry-pi>
- [4] S. K. Subramaniam, S. Husin, Y. Yusop, A. Hamidon, “Real time mailbox alert system via sms or email”, Faculty of Electronics and Computer Engineering, Universiti Teknikal, Malaysia, 2007, *Applied Electromagnetics*, 2007. *APACE 2007. Asia-Pacific Conference* https://www.researchgate.net/publication/4364443_Real_time_mailbox_alert_system_via_SMS_or_email

- [5] Chandra Sekhar Avinash Kottedu, Sai Likesh Vanjavakam, "Notification alert system in postbox", Dept. of Mathematics and Natural Science, Blekinge Institute of Technology, Sweden,
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1677461/FULLTEXT02>
- [6] „Smart Mailbox: These Options Are Available“,
<https://parcelsea.com/2022/09/smart-mailbox-these-options-are-available>
- [7] Yew-Keong Sin, Joe-Win Ng, Zhe-Kang Lim, „Smart Mailbox Using Piezoelectric Sensors“, Faculty of Engineering, Multimedia University, Persiaran Multimedia, Cyberjaya, Selangor, Malaysia, 2023, pp 154-163
- [8] Arm Cortex-M0+ 32-bit MCU, 128 KB Flash, 36 KB RAM, 4x USART, timers, ADC, comm. I/Fs, 2.0-3.6V, Datasheet – production data,
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g070cb.pdf>
- [9] Time-of-Flight ranging sensor, Datasheet – production data,
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
- [10] Quectel M66, Ultra-small Quad-band GSM/GPRS Module,
<https://datasheet.octopart.com/M66FA-04-STDN-Quectel-datasheet-163887582.pdf>
[?_gl=1*1dcuuzl*_ga*MjEzNTMwMDUyMy4xNjk1NjQ4MTE3*_ga_SNYD338KX](https://www.alibabac.com/MTY5NTY0ODExOS4wLjAuMTY5NTY0ODExOS4wLjAuMA..?_gl=1*1dcuuzl*_ga*MjEzNTMwMDUyMy4xNjk1NjQ4MTE3*_ga_SNYD338KX)
[X*MTY5NTY0ODExOS4wLjAuMTY5NTY0ODExOS4wLjAuMA..](https://www.alibabac.com/MTY5NTY0ODExOS4wLjAuMTY5NTY0ODExOS4wLjAuMA..)
- [11] Panasonic NCR18650B Datasheet,<https://octopart.com/datasheet/ncr18650b-panasonic-30796917>
- [12] Mini Solar Lipo Charger Board CN3065 Lithium Battery Charge Chip DIY Outdoor Application Kit Charging Board Module,
https://www.alibabac.com/product-detail/Mini-Solar-Lipo-Charger-Board-CN3065_60775109451.html

Abstract: *The introduction of IoT technologies into various aspects of everyday life and industrial sectors represents a significant step in the development of smart and efficient solutions. In this paper, first of all, a brief overview of current solutions for the application of IoT technologies for automatic notification of the arrival of parcels in the mailbox is given. The basic components of these systems, technological challenges and advantages, as well as potential applications in the real world are analyzed. Then a new solution was proposed that allows overcoming some of the shortcomings or limitations that exist in current solutions, primarily in terms of power supply in extreme ambient conditions with the use of renewable energy sources.*

Keywords: *IoT, sensors, mailbox, GSM*

IoT SOLUTION FOR A MAILBOX WITH AUTOMATIC DELIVERY NOTIFICATION

Nikola Milutinović, Zlatica Marinković, Zoran Stanković, Vera Marković

<https://doi.org/10.37528/FTTE/9788673954752/POSTEL.2023.022>

REGULACIJA DIGITALNE TRANSFORMACIJE - INKLUZIJA

Branka Mikavica, Zorka Laban
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,
b.mikavica@sf.bg.ac.rs, zorkalaban8@gmail.com

Rezime: *Digitalna transformacija predstavlja sveobuhvatan proces primene digitalnih tehnologija u različitim aspektima društva i poslovanja radi unapređenja efikasnosti, podršci inovacijama i prilagođavanju savremenim potrebama. Digitalna dostupnost se odnosi na obezbeđivanje pristupa digitalnim tehnologijama i online resursima pojedincima iz svih društvenih grupa, nezavisno od njihovih sposobnosti i socijalnog statusa. To uključuje obezbeđivanje infrastrukture za pristup Internetu, obrazovanje o digitalnim veštinama i alatima, kao i pristup digitalnim servisima i podacima. Značaj digitalne inkluzije ogleda se u stvaranju inkluzivnijeg društva gde se svi pojedinci, uključujući marginalizovane grupe, kao što su osobe sa invaliditetom i druge ranjive grupe, uključuju u digitalni svet. U ovom radu su analizirani izazovi sa kojima se suočavaju regulatori pri regulaciji digitalne transformacije. Takođe, prikazani su neki od alata koji se mogu primeniti za regulaciju tržišta u uslovima sveobuhvatnih tehnoloških inovacija, sa posebnim osvrtom na obezbeđivanje inkluzivnog okruženja.*

Ključne reči: *digitalna transformacija, inovacije, regulativa, inkluzija*

1. Uvod

Četvrtu industrijsku revoluciju pokreću napredne informaciono-komunikacione tehnologije, ICT (*Information and Communication Technologies*), koje su promenile način na koji ljudi žive i komuniciraju jedni s drugima. Prema podacima Međunarodne unije za telekomunikacije, ITU (*International Telecommunication Union*), 4 milijarde ljudi je imalo pristup Internetu 2020. godine [1]. Poslednjih godina, na korisnike su u velikoj meri uticali veštačka inteligencija, IoT (*Internet of Things*), *blockchain* i 5G. Ovi trendovi su pogurali javni i privatni sektor, uključujući sve državne organe, mala i srednja preduzeća, akademsku zajednicu i druge organizacije da se uključe u digitalnu transformaciju. To podrazumeva prilagođavanje novim zahtevima tržišta kako bi se transformisali procesi i komunikacioni sistemi. Tokom pandemije virusom COVID-19, informaciono-komunikacione tehnologije su se pokazale kao jedinstven i ekskluzivan način za komunikaciju ljudi i obezbeđivanje pristupa vitalnim zdravstvenim i bezbednosnim informacijama, čime je ubrzan proces digitalne transformacije.

Digitalna transformacija se može opisati kao proces koji omogućava institucijama i organizacijama da postanu deo *online* okruženja, odnosno, predstavlja

proces kroz koji institucije kreiraju i usvajaju nove operativne modele i procese koji im omogućavaju da implementiraju, integrišu i iskoriste prednosti digitalnih, mobilnih, društvenih i drugih tehnologija u nastajanju dok steknu nove uvide u podatke kako bi bili efikasniji, dosegli do više građana i poboljšali iskustvo korisnika [1]. Drugim rečima, da bi bila uspešna, digitalna transformacija treba da integriše digitalne tehnologije na način koji omogućava vladama i preduzećima da promene svoj osnovni način rada zajedno sa načinom na koji obezbeđuju vrednost svojim građanima i korisnicima. Digitalna transformacija zahteva i kulturnu promenu unutar organizacija, kako bi se usvojili novi načini razmišljanja i preispitali novi načini rada. Jedan od temelja ove nove kulture uključuje dostupnost i inkluziju.

Digitalna dostupnost je ključ za obezbeđivanje poštovanja prava na komunikaciju jer obezbeđuje digitalnu inkluziju i omogućava iste uslove u celosti za sve pojedince, bez obzira na njihov pol, godine, sposobnosti ili lokaciju. Da bi se postigla digitalna dostupnost, informaciono-komunikacione tehnologije treba da budu pristupačne i priuštive, što znači da treba da budu dizajnirane tako da zadovolje potrebe i sposobnosti što većeg broja pojedinaca, uključujući i osobe sa invaliditetom. Nove platforme i novi načini sastajanja treba da budu dostupni svima. Kroz svoju pristupačnost, omogućavaju osobama sa invaliditetom da rade od kuće, pružaju pristup obrazovanju na daljinu uključujući e-učionice i kurseve i stvaraju veće mogućnosti za korišćenje javne zdravstvene zaštite i pomoćnih usluga, što je posebno korisno u vanrednim situacijama. Uzimajući u obzir brzinu kojom se digitalna transformacija razvija, jedan od glavnih izazova za postizanje i promociju pametnih i inkluzivnih digitalnih zajednica je nizak nivo implementacije digitalne pristupačnosti među vladama, akademskim krugovima, civilnim društvom, industrijom i privatnim sektorom. Ako se osetljive grupe, uključujući osobe sa invaliditetom, starije odrasle osobe, ljudi u udaljenim područjima bez pristupa ili povezanosti, žene i devojke, pojedinci sa niskim nivoom pismenosti, migranti i pripadnici drugih grupa ne uzmu u obzir u procesu digitalne transformacije, njihova marginalizacija bi mogla da se poveća, dovodeći do katastrofalnih posledica.

Regulatorna tela se suočavaju sa složenim izazovima prilikom regulisanja digitalne transformacije. Brza evolucija informaciono-komunikacionih tehnologija stvara poteškoće u usklađivanju sa inovacijama i blagovremenom donošenju regulatornih mera. Za efikasno upravljanje ovim izazovima, ključno je uspostavljanje međusektorske saradnje, kontinuirana edukacija regulatora i fleksibilni regulatorni pristupi koji podržavaju inovacije, uz održavanje bezbednosti i zaštite građana i okoline.

Ovaj rad je organizovan na sledeći način. Nakon uvoda, u drugom poglavlju je istaknut značaj inkluzivne digitalne transformacije i aktivnosti svih relevantnih učesnika. Treće poglavlje opisuje postojeće regulatorne napore i alate koji pružaju podršku uspostavljanju inkluzivnog digitalnog okruženja. Takođe, prikazan je potencijal integracije digitalnih politika i drugih digitalnih strategija, kao i stanje digitalne regulative u zemljama u razvoju. U četvrtom poglavlju je naglašen značaj dostupnosti i pristupačnosti digitalnih servisa u cilju uspostavljanja inkluzivnog digitalnog okruženja. Peto poglavlje predstavlja zaključna razmatranja.

2. Značaj inkluzivne digitalne transformacije

Da bi se obezbedio ravnopravan pristup informacijama, proizvodima i uslugama u virtuelnom okruženju, neophodna je međusobna saradnja vlada, organizacija,

akademske zajednice i nadležnih regulatornih tela. Od suštinskog je značaja da svi učesnici razumeju koncept digitalne transformacije, kao i da sagledaju sve posledice koje će nastati u slučaju da njihova digitalna transformacija ne bude inkluzivna od samog početka. U Tabeli 1 prikazane su neke od aktivnosti koje mogu preduzeti zainteresovani učesnici tako da se ostvari inkluzivnost i dostupnost u digitalnoj transformaciji. Ove preporuke imaju za cilj unapređenje pristupačnosti informaciono-komunikacionih tehnologija i promociju inkluzivnog digitalnog društva, gde svi pojedinci, bez obzira na svoje sposobnosti ili osetljive karakteristike, mogu efikasno koristiti informacione i komunikacione tehnologije.

Tabela 1. Uloge zainteresovanih učesnika u inkluzivnoj digitalnoj transformaciji

Učesnici	Načini za razvijanje inkluzivne i dostupne digitalne transformacije
Vlade i kreatori politike	<ul style="list-style-type: none"> — Doneti zakone i politike koje obezbeđuju jednakost u pogledu pristupa informaciono-komunikacionim tehnologijama. — Raditi sa organizacijama osoba sa invaliditetom i ranjivim grupama tokom donošenja ovih zakona i propisa — Povećati mogućnosti rada za osobe sa invaliditetom korišćenjem pristupačnih proizvoda i usluga. — Podsticati ekonomski i društveni razvoj za sve.
Industrija	<ul style="list-style-type: none"> — Razviti dostupne proizvode i usluge u skladu sa međunarodnim standardima. — Podsticati inkluziju kroz inovacije i korporativnu društvenu odgovornost. — Povećati mogućnosti zapošljavanja za osobe sa invaliditetom korišćenjem i pružanjem pristupačnih proizvoda i usluga.
Akadska zajednica	<ul style="list-style-type: none"> — Stvoriti mogućnosti inženjerima i programerima da dizajniraju i razvijaju pristupačne telekomunikacione servise. — Podsticati kreiranje i upotrebu pristupačnog digitalnog sadržaja. — Razviti pristupačna okruženja za učenje za učenike sa smetnjama u razvoju.
Udruženja osoba sa invaliditetom i drugih osetljivih grupa	<ul style="list-style-type: none"> — Raditi sa vladama kako bi se osiguralo da njihovo pravo na pristup digitalnim servisima bude priznato. — Obezbediti skup minimalnih digitalnih mogućnosti za pristup digitalnoj ekonomiji. — Stvoriti svest o digitalnoj inkluziji i digitalnoj pristupačnosti.
Ostali učesnici	<ul style="list-style-type: none"> — <i>Top-down</i> i <i>bottom-up</i> podrška implementaciji digitalne transformacije. — Identifikacija ključnih partnerstava u cilju unapređenja procesa.

Inkluzivna i dostupna digitalna transformacija predstavlja značajnu evoluciju svake organizacije u potpuno nove načine rada i razmišljanja. Najlakši način da se izvrši transformacija jeste prikupljanje dovoljno informacija koje će se na jasan i ubedljiv način podeliti sa organizacijama uključenim u proces. Ovo ih čini delom promene, promoviše

prednosti nove kulture i novog načina korišćenja tehnologija i objašnjava kako će se ove prednosti prevesti u bolje uslove rada za sve, dok se istovremeno postiže digitalna inkluzija i povećava konkurentska prednost organizacije. Da bi se to postiglo, neophodno je da liderstvo pokreće transformaciju.

Kultura organizacije je ključna komponenta koja će osigurati uspešnu implementaciju digitalne transformacije. Da bi se postigao uspeh, kultura treba da bude podsticajna za promene, prilagođavanje i usvajanje novih tehnologija i treba da podrži inkluziju. Međutim, kultura zahteva praksu i iskustva angažovanih; u protivnom, skoro je nemoguće postići dugotrajne promene. U tom smislu, obuke imaju važnu ulogu. Za države članice ITU-a i druge zainteresovane učesnike je ključno da razviju i ojačaju digitalne veštine, kao i meke veštine kao što su komunikacija, saradnja i empatija. Stručne procene i obezbeđivanje kvalitetnih informacija su od vitalnog značaja, posebno kada se gradi kultura pristupačnosti i inkluzije.

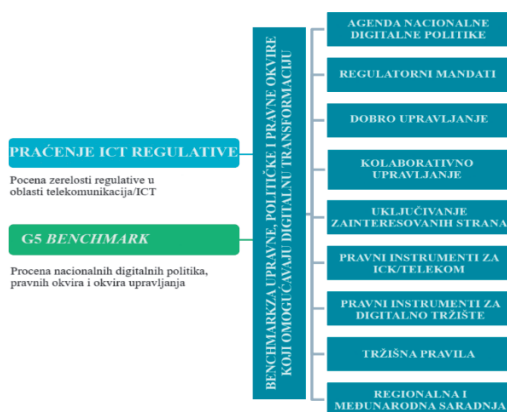
Građani treba da stupe u interakciju i da se angažuju kada su u pitanju digitalne platforme i rešenja. Vlade i organizacije treba da sarađuju sa osobama sa invaliditetom kako bi se upoznale sa karakteristikama njihovih krajnjih korisnika. Time se podstiču pristupačne tehnologije, kreiraju odgovarajući sadržaji i obezbeđuje se relevantna obuka. Zainteresovane strane treba da garantuju da su sve tehnologije, sadržaj i pojedinci pogodni za stvarnu raznolikost, pristupačnost i inkluziju. Iako organizacije mogu da koriste rešenja veštačke inteligencije za učenje i predviđanje obrazaca ponašanja korisnika kako bi ponudile personalizovanu uslugu, ovo možda neće funkcionisati kao jedino rešenje. Zbog različitih karakteristika i potreba pojedinaca, kao i činjenice da je nemoguće upoznati svakog građanina, uključene institucije moraju da obezbede više opcija za pristup podacima. Što su veštine organizacije raznovrsnije, a tehnologija prikladnija i relevantnija, to organizacija može da pruži bolje iskustvo svim korisnicima, bez obzira na različite okolnosti kod pojedinaca [1].

3. Regulatorni alati kao podrška inkluzivnoj digitalnoj transformaciji

Donosioci odluka na nacionalnom nivou suočavaju se sa velikim izazovima na putu ka digitalnom razvoju. Uprkos činjenici da države postaju svesnije da postoji potreba da se fokusiraju i na digitalnu i na industrijsku politiku, pravni i institucionalni kapaciteti za digitalnu transformaciju u mnogim zemljama u razvoju i dalje su nedovoljni [1]. ITU je razvila jedinstven okvir i niz mera kako bi stvorila jedinstveni referentni sistem za procenu napretka zemalja u digitalnoj transformaciji. Ovaj okvir i pripadajuće mere pomažu u definisanju politika, zakonodavstva i upravljanja na nacionalnom, regionalnom i globalnom nivou. Ovi faktori značajno utiču na dva ključna parametra za spremnost političkog, pravnog i upravljačkog okvira za ICT okruženje i digitalna tržišta, odnosno, praćenje ICT regulative i *G5 Benchmark*, koji su oba već dobro uspostavljena alata.

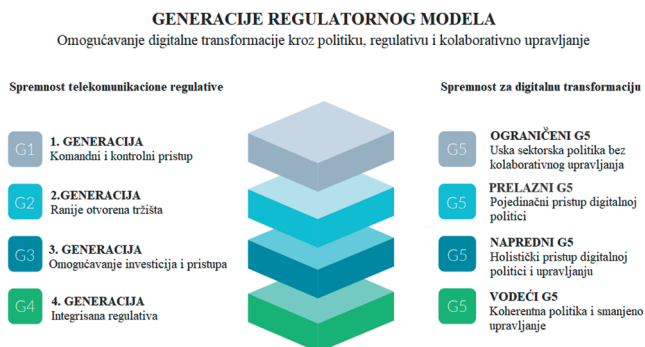
Benchmark za političke, zakonske i upravljačke okvire koji omogućavaju digitalnu transformaciju procenjuje nivo nacionalnih kapaciteta i spremnost za digitalnu transformaciju na osnovu devet tematskih parametara koji nude uvid u trendove i nedostatke u određenim oblastima, na detaljnijem nivou, kao što je prikazno na Slici 1. Analiza parametara omogućava regulatorima i kreatorima politike da uoče svoju poziciju u poređenju sa drugima, dok istovremeno utvrđuju prednosti, nedostatke i prioritete za buduće reforme.

Praćenje ICT Regulative je alat zasnovan na dokazima koji pomaže donosiocima odluka i regulatorima da shvate brzu evoluciju ICT regulative. Ovaj alat precizno ukazuje na promene koje se dešavaju u ICT regulatornom okruženju. Olakšava *Benchmarking* i identifikaciju trendova u pravnim i regulatornim okvirima u ICT okruženju. Ne meri kvalitet, nivo implementacije ili učinak postojećih regulatornih okvira, već beleži njihovo postojanje i karakteristike. Pomaže u praćenju napretka i identifikaciji nedostataka u regulatornim okvirima, ukazujući na razloge za dalju regulatornu reformu u pravcu postizanja inkluzivnog ICT sektora.



Slika 1. Skup parametara za regulatorne okvire koji omogućavaju digitalnu transformaciju

Referentni pokazatelj zajedničke digitalne regulative pete generacije, ili *G5 Benchmark*, je alat zasnovan na podacima koji se fokusira na pravne okvire za digitalne tehnologije i ima značajnu komponentu kolaborativnog upravljanja [1]. *G5 Benchmark* je dizajniran na osnovu Smernica za najbolju praksu GSR19 (*Global Symposium for Regulators 2019*) i zajedno sa alatom za praćenje ICT regulative, služi kao kompas za regulatore na njihovom putu digitalne transformacije, pomažući u uspostavljanju puta ka regulatornoj izvrsnosti i naprednoj digitalnoj ekonomiji, kao što je to prikazano na Slici 2.



Slika 2. Generacije regulatornog modela - G5 model: razvoj regulatornog okvira za digitalnu transformaciju

Digitalna transformacija ekonomije i društva zahteva okruženje koje omogućava tradicionalno telekomunikaciono tržište, digitalna tržišta i učesnike koji omogućavaju digitalizaciju u svim privrednim sektorima. Raznovrsni skup komplementarnih politika i regulatornih alata i širok spektar struktura upravljanja mogu se iskoristiti da bi se obezbedilo takvo okruženje, kao i značajna univerzalna povezanost i digitalni javni servisi, uz istovremeno podsticanje digitalnih inovacija, stvaranja vrednosti i ekonomskih mogućnosti [2].

3.1. Integracija digitalnih politika i drugih regulatornih pristupa

Uprkos tome što su digitalne politike dobile zamah poslednjih nekoliko godina, njihovo usvajanje je još uvek u ranoj fazi, iza tradicionalnih ekonomskih politika u mnogim zemljama i njihov obim često ostaje delimičan. Referentni pokazatelj koji se odnosi na pravac, obim i operativne mehanizme nacionalnih planova digitalne politike je postignut samo u 43% država na globalnom nivou [2].

Oko 88% zemalja širom sveta usvojilo je nacionalnu digitalnu politiku ili strategiju do kraja 2022. godine. Međutim, u samo polovini njih su nacionalne politike usklađene sa ciljevima održivog razvoja, a nedostaje im jasna dugoročna strategija. Takođe, u samo nešto više od jedne trećine svih zemalja, operativni mehanizmi čine deo digitalne politike; samo jedna od sedam strategija uključuje odredbe za promovisanje digitalne inkluzije žena i devojčica, a samo jedna od pet strategija se bavi osobama sa invaliditetom i mladim ljudima.

Dok je 169 zemalja širom sveta usvojilo plan širokopojasnog povezivanja, samo 110 ima sveobuhvatnu digitalnu agendu ili strategiju digitalne transformacije. U svim regionima, najmanje dve trećine zemalja ima plan širokopojasnog pristupa, a najmanje polovina ima nacionalnu digitalnu strategiju. Pored toga što su nacionalne digitalne strategije preduslov da vlade ubrzaju tranziciju ka digitalnim ekonomijama i društvima, one zahtevaju snažan i raznovrstan skup politika podrške i visok nivo koherentnosti politika širom sveta. Međutim, manje od polovine svih zemalja uključuje pristup širokopojasnoj mreži kao deo politike univerzalnog pristupa i servisa; manje od polovine zemalja širom sveta ima uspostavljenu politiku inovacija; manje od polovine svih zemalja usvojilo je instrumente politike koji imaju za cilj da podrže prelazak na održivu potrošnju i proizvodnju ili mehanizam koordinacije za održivu potrošnju; manje od petine zemalja širom sveta razvilo je globalnu strategiju za zapošljavanje mladih ili implementiralo globalni pakt za zapošljavanje međunarodne organizacije rada koji poziva na poštovanje osnovnih principa i prava na radu, jačanje socijalne zaštite, promovisanje rodne ravnopravnosti, učešće i socijalni dijalog, omogućavajući pozitivan efekat prelivanja na digitalno tržište rada [2].

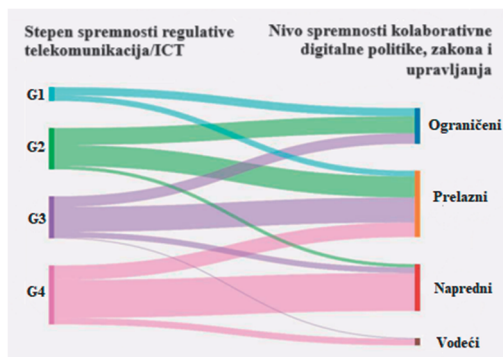
3.2. Uticaj digitalne politike i regulative u zemljama u razvoju

Uprkos sve glasnijim javnim narativima koji naglašavaju važnost korišćenja digitalnih rešenja za društveni i ekonomski razvoj, samo nešto više od trećine zemalja širom sveta je na vodećem ili naprednom nivou pripremljenosti, sa političkim, pravnim okvirima i okvirima upravljanja koji su pogodni za digitalnu transformaciju. Preko 40% zemalja započelo je tranziciju sa specifičnih sektora ka međusektorskim politikama, pravnim modelima i modelima upravljanja, ali su reforme do sada bile parcijalne [2].

Skoro četvrtina zemalja raspolaže samo ograničenim digitalnim kapacitetima. Dve trećine zemalja ne uspeva da kreira politiku i upravljanje za digitalni razvoj, i ako se trenutni trend nastavi, mnoge zemlje u razvoju neće moći da oslobode razvojni potencijal digitalnih servisa i rešenja, ne ispunjavajući ciljeve održivog razvoja do 2030. godine.

Razvoj politike, pravnog okvira i okvira upravljanja za telekomunikaciona i digitalna tržišta prati sličan trend u većini zemalja širom sveta (Slika 3):

- Zemlje u grupi G1 najčešće imaju ograničenu spremnost za digitalnu transformaciju.
- Grupa G2 je podeljena između kategorije ograničenih i prelaznih sa niskim nivoom spremnosti njihovih pravnih i upravljačkih okvira.
- Većina zemalja u grupaciji G3 još uvek prelazi na više nivoe digitalne zrelosti.
- Većina zemalja u grupaciji G4 ima kapacitete za napredno digitalno upravljanje, a nekolicina njih predvodi digitalnu transformaciju na globalnom nivou (G5).



Slika 3. Trend razvoja političkog, pravnog i upravljačkog okvira za digitalnu transformaciju

Razvoj digitalnih političkih, pravnih i upravljačkih okvira širom regiona i unutar regiona je izrazito neujednačen. Dve trećine evropskih zemalja postiglo je napredni nivo zrelosti u poređenju sa većinom zemalja u svim ostalim regionima podeljenim između prelazne i ograničene grupe. Manje od trećine zemalja Afrike, Azije i Pacifika i Amerike nalazi se u naprednoj grupi. Među arapskim državama, samo jedna od šest je postigla naprednu spremnost i nijedna od zemalja Komonvelta to do sada nije uspeła.

Samo devet zemalja (manje od 5% zemalja širom sveta) trenutno je opremljeno nacionalnim okvirima za digitalna tržišta koji im omogućavaju da postanu lideri u transformacionom razvoju digitalnih ekonomija i društava. Nemačka, Ujedinjeno Kraljevstvo, Kanada, Republika Koreja, Singapur, Estonija, Finska, Australija i Holandija imaju najpovoljnije modele digitalne politike i upravljanja, koji već transformišu svoje privrede i društva kroz nova ekonomska rešenja i stvaraju nove društvene mogućnosti [2].

4. Regulacija dostupnosti i pristupačnosti digitalnih servisa kao temelj digitalne inkluzije

Da bi se postigla digitalna dostupnost, ICT treba da budu pristupačne i priuštive, što znači da treba da budu dizajnirane tako da zadovolje potrebe i sposobnosti što većeg

broja ljudi, uključujući i osobe sa invaliditetom. Nove platforme i novi načini sastajanja treba da budu dostupni svima. Kroz svoju pristupačnost, omogućavaju osobama sa invaliditetom da rade od kuće, pružaju pristup obrazovanju na daljinu uključujući e-učionice i kurseve i stvaraju veće mogućnosti za korišćenje javne zdravstvene zaštite i pomoćnih usluga, što je posebno korisno u situacijama katastrofa.

Ukupno 61% država članica UN (*United Nations*) je izradilo zakone i akte o invalidnosti sa ciljem da ukinе diskriminaciju osoba sa posebnim potrebama i eliminiše barijere ka punom uživanju njihovih prava i njihovom uključivanju u društvo. Ovi zakoni i akti doprinose napretku ka implementaciji Konvencije o pravima osoba sa invaliditetom, CRPD (*Committee on the Rights of Persons with Disabilities*) u nacionalnom zakonodavstvu [3]. Ipak, samo mali procenat zemalja ima zakone i propise koji imaju za cilj da eliminišu digitalni jaz [1].

Mnoga prava opisana u Konvenciji o pravima osoba sa invaliditetom su zagarantovana upotrebom tehnologije. Budući da je Konvencija o pravima osoba sa invaliditetom jedna od najšire ratifikovanih konvencija o ljudskim pravima Ujedinjenih nacija (do 2021. godine je ratifikovalo 95% država članica), države potpisnice imaju obavezu da podnose izveštaje UN-u o njenom sprovođenju. U okviru svojih alata i samoprocene za primenu pristupačnosti ICT prema Konvenciji, ITU je uključio smernice za pregled zahteva za pristupačnost unutar pravnog okvira koji se tiče korišćenja tehnologije u kontekstu različitih članova Konvencije. Na ovaj način, komplet alata se može koristiti ne samo za praćenje implementacije pristupačnosti ICT, već i za praćenje napretka države u pogledu njenih obaveza izveštavanja prema Konvenciji [4].

Strategija digitalne transformacije za Afriku (2020-2030), koju je objavila Afrička unija u avgustu 2020. godine, predstavlja regionalni okvir za korišćenje digitalnih tehnologija i inovacija. Cilj strategije je transformacija afričkih društava i ekonomija u cilju promovisanja integracije, generisanja inkluzivnog ekonomskog rasta, stimulisanja otvaranja novih radnih mesta, zatvaranja digitalnog jaza i iskorenjivanja siromaštva u korist društveno-ekonomskog razvoja kontinenta. Uz univerzalno dizajnirane tehnologije (dostupne ICT) i uz dodatnu podršku koju pružaju asistivne tehnologije, sve osobe mogu učestvovati i doprineti ekonomskom i društvenom razvoju izazvanom upotrebom ICT-a. Ipak, ako se ne uzmu u obzir zahtevi za uključivanje tehnologije, Strategija digitalne transformacije za Afriku rizikuje da proširi digitalni jaz i zanemari ranjive grupe. Jasno razumevanje digitalne inkluzije je ključno za postizanje digitalno inkluzivnih zajednica.

Da bi se uspostavila rodna odgovornost, digitalne politike, strategije, programi i projekti treba da razmotre glavne izazove koji sprečavaju žene da u potpunosti iskoriste prednosti koje nudi digitalna ekonomija. Neki od ovih izazova odnose se na pristup žena digitalnim tehnologijama, digitalnim veštinama, finansijama, preduzetništvu i liderstvu, infrastrukturi i digitalnim uslugama [5].

U mnogim delovima sveta, žene i devojke su obično u lošijem položaju u poređenju sa muškarcima u pogledu pristupa digitalnim tehnologijama, kao što su pametni telefoni i mogućnost pristupa Internetu. Kada je reč o posedovanju mobilnih telefona, situacija žena u odnosu na muškarce se poboljšala poslednjih godina. ITU sugerise da je u 30 od 60 zemalja za koje su dostupni podaci za vremenski okvir 2018-2020, postignut rodni paritet u vlasništvu mobilnih telefona, a u još deset zemalja više žena nego muškaraca poseduje mobilni telefon. Ipak, u 21 zemlji žene zaostaju za muškarcima u vlasništvu mobilnih telefona, u nekim slučajevima i sa velikom razlikom.

U zemljama sa niskim i srednjim prosečnim bruto domaćim prihodima, sada je 7 % manja verovatnoća da će žene posedovati mobilni telefon u odnosu na muškarce. Žene takođe imaju 15 % manje šanse da poseduju pametni telefon nego muškarci, što je pad od 20% u 2019. godini [5].

Pametni telefoni zahtevaju pouzdan pristup Internetu. U poređenju sa muškarcima, manje žena pristupa Internetu, iako se rodna podela u tom domenu sužava u svim regionima. Na globalnom nivou, 2020. godine, 62 % muškaraca i 57% žena je pristupalo Internetu. Globalni rezultat rodne jednakosti poboljšao se sa 0,89 u 2018. na 0,92 u 2020. godini. Rodna neravnopravnost na Internetu je očiglednija u nekim regionima sveta. Prema podacima ITU-a, jednakost među polovima je postignuta u razvijenim zemljama i u Americi u celini, i skoro postignuta u zemljama Komonvelta, malim ostrvskim državama u razvoju SIDS (*Small Island Developing States*) i Evropi. Podela je i dalje velika u najmanje razvijenim zemljama, gde samo 19 % žena ima mogućnost pristupa Internetu (za 12 % manje od muškaraca), zemljama u razvoju bez izlaza na more LLDC (*Landlocked Developing Countries*) (27 % žena naspram 38 % muškaraca), Region Afrike (24 % naspram 35 %) i region arapskih država (56 % naspram 68 %) [5].

Definisano je deset preporuka kako bi se žene u zemljama sa niskim i srednjim prosečnim bruto domaćim prihodima podstakle da koriste mobilni telefon [6]:

- Postaviti rodne ciljeve koje rukovodstvo podržava i saopštava.
- Imenovati odgovarajuće odeljenje koje će se boriti za doseganje ženskih kupaca.
- Biti u toku sa podacima.
- Razumeti i težnje i izazove žena na tržištu.
- Uspostaviti komercijalne prilike od samog početka.
- Osigurati da se ponude holistički bave ženskim preprekama na tržištu.
- Prilagoditi glavne proizvode tako da se efikasno dopre do ženskih kupaca.
- Pobriniti se da marketing bude prilagođen da dopre do žena kao i muškaraca.
- Angažovati partnere da bi se proširili dometi i iskoristile komplementarne snage
- Uključivati žene u aktivnosti distribucije kako bi se uticalo da postanu klijenti.

Preporuke su zasnovane na iskustvu GSMA (*Global System for Mobile Communications Association*) uz blisku saradnju sa mobilnim operatorima. Važno je napomenuti da ove preporuke nisu relevantne samo za mobilne operatore, već će biti korisne i za druge organizacije koje ženama pružaju proizvode i usluge koje su u vezi sa mobilnim uređajima. To uključuje širok spektar aktera u industriji, političke donosiocel odluka, nevladine organizacije i razvojnu zajednicu [6].

5. Zaključak

Najznačajniji cilj digitalne transformacije mora biti inkluzija - osiguravanje da tehnološki napredak bude dostupan svima, bez obzira na njihove osobine. To zahteva pažljivo planiranje i implementaciju politika koje promovišu digitalnu dostupnost. Snažna regulativa je ključna u ovom procesu i mora pratiti brzinu tehnoloških promena i globalnu prirodu Interneta. Međutim, ova regulativa ne sme ograničiti inovacije; umesto toga, treba da uspostavi ravnotežu između tehnološkog napretka i zaštite korisnika. Poseban naglasak mora se staviti na inkluziju osoba sa invaliditetom i žena u digitalno

okruženje. Osiguravanje pristupačnosti digitalnih tehnologija za osobe sa invaliditetom je imperativ, što podrazumeva razvoj alata i aplikacija koje omogućavaju korišćenje informaciono-komunikacionih tehnologija osobama sa različitim sposobnostima. Istovremeno, inkluzija žena u digitalnom svetu zahteva aktivno uključivanje, podršku i osnaživanje kako bi se prevazišli tradicionalni rodni stereotipi i obezbedilo ravnopravno učešće u tehnološkom sektoru. Dakle, digitalna transformacija je ključna za društveni i ekonomski napredak, ali samo ako je praćena inkluzivnom politikom, rodnom ravnopravnošću i efikasnom regulativom. Balans između tehničko-tehnoloških inovacija, inkluzije osoba sa invaliditetom i žena je suštinski za izgradnju bolje digitalne budućnosti za sve.

Literatura

- [1] M. Carrillo, „*Towards building inclusive digital communities: ITU toolkit and self-assessment for ICT accessibility implementation*“, ITU Telecommunication Development Bureau, Ženeva, 2021.
- [2] Y. Lozanova, „*Global Digital Regulatory Outlook 2023: Policy and regulation to spur digital transformation*“, ITU Telecommunication Development Bureau, Ženeva, 2023.
- [3] *Convention on the Rights of Persons with Disabilities and Optional Protocol*, Department of Economic and Social Affairs, United Nations, 2006.
- [4] M. Duhem, „*ICT accessibility overview: Assessment for the Africa region*“, ITU Telecommunication Development Bureau, Ženeva, 2022.
- [5] M. Filadoro, „*Handbook on mainstreaming gender in digital policies*“, ITU Telecommunication Development Bureau, Ženeva, 2023.
- [6] M. Filadoro, „*Gender equality in digital policy in Ethiopia*“, ITU Telecommunication Development Bureau, Ženeva, 2023.

Abstract: *Digital transformation represents a holistic approach to digital technology application in various social and business aspects to improve efficiency, support innovations and adapt to contemporary needs. Digital availability refers to providing access to digital technologies and online resources to individuals from all respective social groups, regardless of their capabilities and social status. It comprises providing infrastructure for Internet access, education on digital skills and tools and access to digital services and data. The digital inclusion importance is reflected in establishing a more inclusive digital environment where all individuals, including marginalized groups, persons with disabilities and other vulnerable groups, are included in a digital world. In this paper, challenges in the digital transformation regulation are analyzed. Furthermore, some regulatory tools for market regulation in the context of comprehensive technology innovation are presented, with special emphasis on providing an inclusive digital environment.*

Keywords: *digital transformation, innovation, regulation, inclusion*

DIGITAL TRANSFORMATION REGULATION - INCLUSION

Branka Mikavica, Zorka Laban

INDEKS AUTORA

Bjelić Nenad	21	Marković Goran	123
Blagojević Mladenka	87	Marković Vera	211
Bojović Nebojša	31	Matijašević Nikola	153
Bondžulić Boban	143	Medić Adisa	3
Bošković Sara	99	Mikavica Branka	221
Bugarčić Pavle	191	Milenković Miloš	31
Bukumirović Milan	43	Milošević Mila	53
Čačić Nataša	77	Milutinović Jelena	65
Čupić Aleksandar	87	Milutinović Nikola	211
Dobrodolac Momčilo	99	Mitrović Slobodan	123
Dželetović Aleksandar	173	Mladenović Snežana	201
Đogatović Marko	153	Ermin Muharemović	3
Đorđević Dragan	173	Ostojić Ljubomir	53
Gavrovska Ana	163	Pavlović Boban	133
Gezović Sonja	53	Pećanac Slobodan	43
Golubović Nemanja	21	Pejović Dragan	53
Ilić Ana	181	Petrović Vladeta	11
Janeva Biljana	11	Popović Đorđe	65
Janković Slađana	201	Prokopijević Periša	173
Jevtić Nenad	191	Radojičić Valentina	123
Jovanović Bojan	77	Radović Jelena	181
Jovčić Stefan	99	Rakić Estera	77
Knežević Nikola	31	Samčović Andreja	153
Končar Miloš	173	Simić Miodrag	11
Kosovac Amel	3	Stanivuković Bojan	43
Kostić-Ljubisavljević Aleksandra	113	Stanković Zoran	211
Laban Zorka	221	Stefanović Ivana	201
Lazarević Dragan	99	Stojanović Mirjana	113
Luković Aleksandar	163	Stojanović Nenad	143
Malnar Marija	191	Stojanović-Višić Biljana	11
Manović Momir	113	Šarac Dragana	77
Marinković Zlatica	211	Uzelac Ana	201
Marković Dejan	87	Zelmati Omar	133

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.39(082)
004.72:316.774(082)
004.738.5:339(082)
656.8(497.11)(082)

**СИМПОЗИЈУМ о новим технологијама у поштанском и
телекомуникационом саобраћају (41 ; 2023 ; Београд)**

Zbornik radova / Četrdeset prvi Simpozijum o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju PosTel 2023, Beograd, 28. i 29. novembar 2023. godine ; [organizator] Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Odsek za poštanski i telekomunikacioni saobraćaj ; editori Valentina Radojičić ... [et al.]. - Beograd : Univerzitet, Saobraćajni fakultet, 2023 (Beograd : Pekograf). - X, 231 str. : ilustr. ; 24 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 300. - Str. V-VI: Predgovor / editori. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts. - Registar.

ISBN 978-86-7395-475-2

а) ПТТ саобраћај -- Зборници б) ПТТ служба -- Организација -- Србија -- Зборници в) Мултимедијалне комуникације -- Зборници г) Електронско поштовање -- Зборници д) Телекомуникационе мреже -- Зборници

COBISS.SR-ID 130076937



Република Србија

Министарство науке,
технолошког развоја
и иновација



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ



Република Србија

Министарство
информисања и
телекомуникација



РЕПУБЛИКА СРБИЈА
РАТЕЛ
РЕГУЛАТОРНО ТЕЛО ЗА
ЕЛЕКТРОНСКЕ КОМУНИКАЦИЈЕ
И ПОШТАНСКЕ УСЛУГЕ



mts



SECO
SOUTH EASTERN EUROPE



IRITEL
BEOGRAD



ROAMING
NETWORKS



K B V
DATACOM