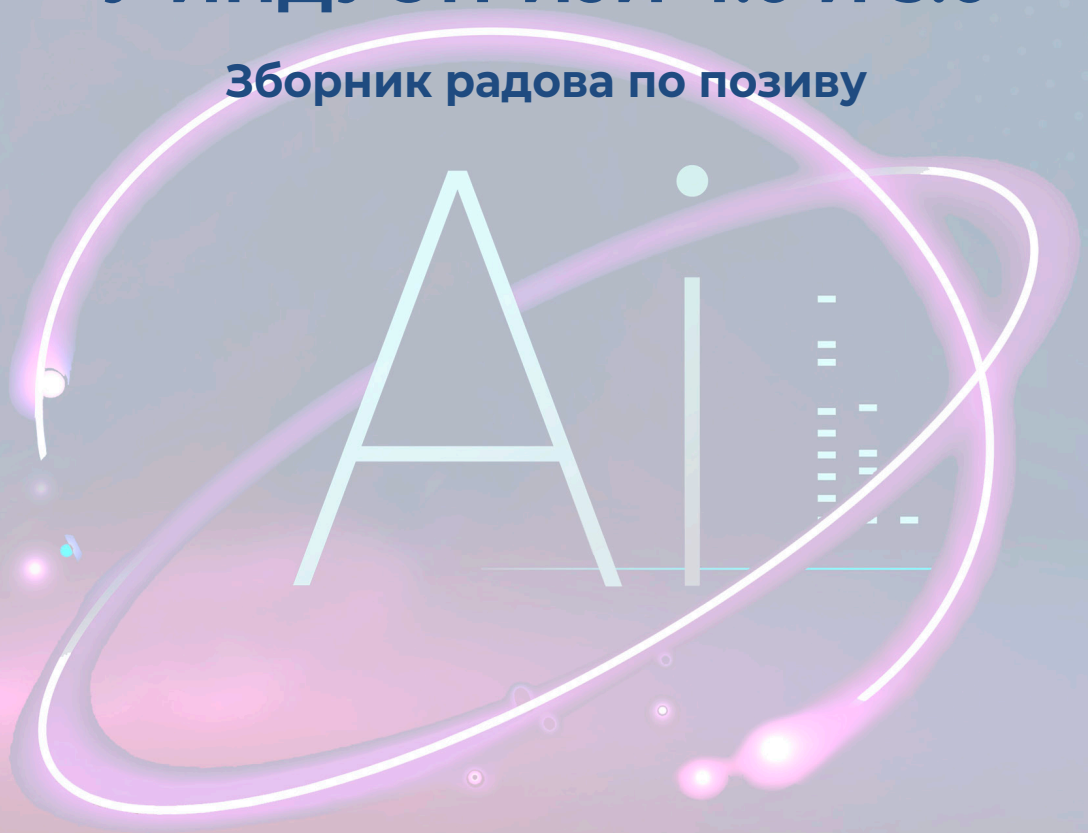
САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ
ИНЖЕЊЕРСКА АКАДЕМИЈА СРБИЈЕ

Научна конференција са
међународним учешћем

ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА У ИНДУСТРИЈИ 4.0 И 5.0

Зборник радова по позиву



Београд
12. децембар 2025.

САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ
ИНЖЕЊЕРСКА АКАДЕМИЈА СРБИЈЕ

Научна конференција
са међународним учешћем

Вештачка интелигенција у Индустрији 4.0 и 5.0

Зборник радова по позиву

Београд, 12. децембар 2025.

Издавач:

Савез инжењера и техничара Србије, Београд

За издавача:

Мр Богдан Влаховић, генерални секретар

Програмски одбор:

Емеритус проф. др Илија Ћосић (председник), проф. др Ненад Филиповић, проф. др Стеван Станковски, проф. др Борис Делибашић, др Саша Милић, проф. др Борис Думнић, проф. др Милан Николић, проф. др Властимир Николић, проф. др Марко Милојковић, проф. др Милош Симоновић, проф. др Мијодраг Милошевић, проф. др Александар Рикаловић, проф. др Владо Делић, др Радослав Раковић, академик проф. др Исак Карабеговић, проф. др Бранко Каталинић, проф. др Горан Путник, др Мирослав Сокић, проф. др Снежана Урошевић, проф. др Васо Манојловић и др Милован Живковић

Организациони одбор:

Мр Богдан Влаховић (председник), емеритус проф. др Илија Ћосић, др Радослав Раковић, проф. др Мијодраг Милошевић, др Гвозден Јовановић, Гордана Марковић, Оливера Ћосовић, MSc, Маријана Михајловић, есс и Оља Јовичић, дипл.прав.

Главни и одговорни уредник:

Емеритус проф. др Илија Ћосић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад

Рецензенти:

др Радослав Раковић, Инжењерска академија Србије, Београд
проф. др Борис Думнић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад
Емеритус проф. др Наташа Госпић, Инжењерска академија Србије, Београд
Емеритус проф. др Илија Ћосић, Инжењерска академија Србије, Београд

Уређивачки одбор:

Проф. др Снежана Урошевић, Савез инжењера и техничара Србије, Београд
Др Мирјана Стојановић, Инжењерска академија Србије, Београд
Проф. др Василије Исајев, Инжењерска академија Србије, Београд
Др Радослав Раковић, Инжењерска академија Србије, Београд

Лектура и коректура:

Оливера Ћосовић, маст. филол.

Технички уредник:

Оља Јовичић, дипл. прав.

Штампа: Академска издања, Земун

Ова публикација је отвореног приступа који се дистрибуира под условима Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Тираж: 150 примерака

ИСБН: 978-86-82563-35-8

Година издавања: 2025.

ОРГАНИЗАТОРИ

САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ

ИНЖЕЊЕРСКА АКАДЕМИЈА СРБИЈЕ

СУОРГАНИЗАТОРИ

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука

Универзитет у Нишу, Машински факултет

Универзитет у Новом Саду, Технички факултет

„Михајло Пупин“, Зрењанин

Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина

ПОД ПОКРОВИТЕЉСТВОМ

Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

004.896(082)
330.341.1(082)

НАУЧНА конференција са међународним учешћем Вештачка интелигенција

у идустрији 4.0 и 5.0 (2025 ; Београд)
Зборник радова по позиву / Научна конференција са међународним учешћем

Вештачка интелигенција у идустрији 4.0 и 5.0, Београд, 12. децембар 2025. ; [главни

и одговорни уредник Илија Ћосић]. - Београд : Савез инжењера и техничара Србије,

2025 (Земун : Академска издања). - 130 стр. : илустр. ; 24 cm

Текст ћир. и лат. - Тираж 150. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-82563-35-8

а) Вештачка интелигенција -- Зборници b) Индустрија -- Зборници

COBISS.SR-ID 181051913

ПРЕДГОВОР

Вештачка интелигенција (ВИ) трансформише индустрију и представља основу за концепт нове индустријализације у свету, Индустрију 4.0 и 5.0. Нова индустријска окружења укључују примену бројних савремених дигиталних и интелигентних технологија, које компанијама пружају могућност да аутоматизују и унапреде своје пословне процесе. Увођењем нових, „паметних“ технологија, индустријски системи постају реконфигурабилни и пројектују се тако да омогуће брзу промену структуре, како би се капацитети и функционалност што брже прилагодили персонализованим захтевима тржишта. Индустријска опрема, системи и процеси се међусобно повезују применом ВИ, што омогућава дељење и анализу података у реалном времену и комуникацију између различитих индустријских сектора. При томе се подразумева примена иновација, дигиталних алата и интелигентних сервиса у свим сегментима привреде. Крајњи циљ је увођење принципа паметне организације, набавке, надзора, одржавања, производње и дистрибуције у савременим индустријским решењима, што омогућава брже, флексибилније и ефикасније пословање и израду производа побољшаног квалитета уз смањене трошкове.

Паметна фабрика је решење за индустријске услове који имају хипер-динамички карактер и који се брзо мењају. Подразумева се примена аутоматизације и сталне оптимизације токова рада, што омогућава максимално искоришћење радне снаге и индустријских ресурса. Основни задатак технологија и сервиса у оквиру паметне фабрике је имплементација ВИ у свим аспектима. На овај начин се долази до концепта паметне производње која представља савремени концепт рачунаром интегрисане производње који користи умрежавање и ВИ за праћење производног процеса. Циљ је аутоматизација операција и коришћење аналитике података из производног процеса за побољшање и унапређење производње. Паметна производња се базира на коришћењу интелигентних технологија и решења за оптимизацију производног процеса. При томе се примењују интелигентни алати који се базирају на методама ВИ, машинског учења, дубоког учења, као и на метахеуристичким алгоритмима и биолошки инспирисаним методама.

Циљ конференције је приказ актуелног стања као и трендова развоја и примене метода и алгоритама ВИ у модерном индустријском окружењу, како у свету, тако и у региону и Републици Србији. Због своје актуелности, ова тематика је од изузетног значаја за будућност привреде, с обзиром да је реч о убрзаном развоју нових технологија које неминовно доводе до многобројних промена у индустрији и привреди. Прилагођавање индустрије и привреде кроз дефинисање нове стратегије будућег развоја, као и адаптирање академске заједнице кроз иновирање едукације будућих инжењера, у складу са новим паметним и интелигентним технологијама, представљају императив и незаобилазан корак на путу развоја савременог друштва.

Тематске области конференције су:

1. Примена вештачке интелигенције у индустрији
2. Технологије Индустрије 4.0/5.0 и њихова имплементација
3. Паметне фабрике и паметна производња
4. Кибернетско-физички системи у индустрији
5. Интелигентна аутоматизација процеса
6. Машинско учење и интелигентни пословни системи
7. Аналитика и управљање подацима у привреди
8. Паметно одржавање и надзор индустријских система
9. Вештачка интелигенција у ланцу набавке
10. Вештачка интелигенција у одрживом развоју и заштити на раду
11. Примена вештачке интелигенције у образовању (Образовање 4.0/5.0)

Посебну захвалност дугујемо Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на подршци у одржавању конференције и препознавању значаја овог научног скупа. Захваљујемо се ауторима радова на уложеном труду и надамо се да ће њихови радови бити довољно инспиративни за учеснике скупа да се кроз дискусију размене искуства и унапреде сазнања свих нас о овој веома актуелној области.

ПРОГРАМСКИ И ОРГАНИЗАЦИОНИ ОДБОР

Београд 12.12.2025. године

С А Д Р Ж А Ј

ПРЕДГОВОР **5**

Исак Карабеговић
Индустрија 4.0 као покретач иновација у аутомобилској производњи: искуства Кине, Индије и Сједињених Америчких Држава **9**

Владо Делић, Милан Сечујски, Синиша Сузић, Тијана Носек
Вук Станојев
Прогрес у развоју и примени говорних технологија у ери вештачке интелигенције..... **35**

Стеван Станковски, Гордана Остојић
Развој и унапређење наставних процеса употребом алата/платформи заснованих на вештачкој интелигенцији..... **47**

Васо Манојловић, Мирослав Сокић, Гордана Марковић,
Гвозден Јовановић
Анализа и аутоматска детекција дефеката на ливеним деловима применом дубоког учења..... **55**

Далибор Шељмеши, Вишња Огњеновић, Велибор Илић,
Далибор Добриловић, Владимир Бртка, Милан Николић
Систем за конструкцију глобалних мапа из мобилних лидар снимака у индустријским окружењима..... **63**

Мирослав Стефановић, Марко Штака, Ђорђе Пржуљ
Примена блокчејн технологије и вештачке интелигенције у Индустрији 4.0 ..... **73**

Мића Ђурђев, Мијодраг Милошевић, Дејан Лукић, Боривој Новаковић,
Лука Ђорђевић, Владимир Тодић
Алгоритми вештачке интелигенције у оптимизацији технолошких процеса обраде производа **83**

Младен Вуковић, Мијодраг Милошевић, Дејан Лукић, Дејан Божић
Проширена стварност у Индустрији 4.0/5.0..... **93**

Јелена Марјановић, Стеван Станковски
Улога вештачке интелигенције у унапређењу сајбер безбедности **103**

Снежана Тадић, Бојана Граовац, Младен Крстић, Милош Вељовић
Логистика 4.0 у клиничким истраживањима: избор најповољније технологије 111

Милош Милашиновић, Дамјан Иветић, Ања Ранђеловић, Роберт Љубичић, Жељко Василић, Огњен Говедарица, Вељко Продановић, Лука Винокић, Љиљана Брајовић, Милан Гоцић
Дигитални близанци као подршка управљању канализационим системима 121

INDUSTRIJA 4.0 KAO POKRETAČ INOVACIJA U AUTOMOBILSKOJ PROIZVODNJI: ISKUSTVA KINE, INDIJE I SJEDINJENIH AMERIČKIH DRŽAVA

INDUSTRY 4.0 AS A CATALYST FOR INNOVATION IN AUTOMOTIVE MANUFACTURING: COMPARATIVE EXPERIENCES FROM CHINA, INDIA, AND THE UNITED STATES

ISAK KARABEGOVIĆ[1]

Pregledni rad
DOI: 10.5937/VI25009K

Rezime: Razvoj Industrije 4.0 temeljno mijenja globalnu automobilsku industriju, čineći digitalizaciju, automatizaciju i robotiku ključnim pokretačima inovacija i konkurentnosti. Ovaj rad analizira uticaj i stepen implementacije tehnologija Industrije 4.0 u tri vodeće zemlje s različitim razvojnim profilima – Kini, Indiji i Sjedinjenim Američkim Državama. Kroz komparativni pristup, istražuje se veza između godišnje proizvodnje vozila, intenziteta primjene industrijskih robota i širine integracije pametnih proizvodnih rješenja. Poseban naglasak stavljen je na ulogu robotike, uključujući industrijske i kolaborativne robote, kao ključne tehnologije koje određuju efikasnost, fleksibilnost i inovativnost proizvodnih procesa. Analiza obuhvata i osnovne komponente Industrije 4.0 – kiber-fizičke sisteme, Internet stvari (IoT), digitalne tvornice, umjetnu inteligenciju (AI) i digitalne blizance – koje zajedno omogućavaju sinergiju između čovjeka, mašina i podataka. U radu se prikazuju trendovi u robotizaciji i digitalnoj integraciji proizvodnih pogona, uz poređenje nacionalnih politika i investicionih prioriteta. Rezultati istraživanja pokazuju da Kina prednjači u apsolutnoj proizvodnji i instalacijama robota, Sjedinjene Američke Države ulažu u razvoj visokoautomatizovanih i inteligentno povezanih proizvodnih sistema, dok Indija ubrzano gradi kapacitete kroz selektivnu i prilagođenu implementaciju tehnologija Industrije 4.0. Zaključuje se da različiti pristupi digitalnoj transformaciji oblikuju specifične modele konkurentnosti, tehnološke samostalnosti i održivog razvoja u automobilskoj industriji.

Ključne riječi: Industrija 4.0, automobilska industrija, robotika, automatizacija, pametna proizvodnja, Kina, Indija, Sjedinjene Američke Države

Abstract: The rapid evolution of Industry 4.0 is fundamentally reshaping the global automotive sector, positioning digitalization, automation, and robotics as core drivers of innova-

[1] Isak Karabegović, Akademija nauka i umetnosti Bosne i Hercegovine, Bistrik 7, Sarajevo, Bosna i Hercegovina, isak1910@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-9440-4441

tion and competitiveness. This paper examines the implementation and impact of Industry 4.0 technologies in three leading vehicle-producing countries with distinct industrial trajectories – China, India, and the United States. Through a comparative approach, the study explores the relationship between annual vehicle production, the intensity of industrial robot adoption, and the integration of smart manufacturing solutions. Special attention is given to robotics—both industrial and collaborative—as a key enabler of efficiency, flexibility, and innovation in production systems. The analysis also highlights the fundamental components of Industry 4.0, including cyber-physical systems, the Internet of Things (IoT), digital factories, artificial intelligence (AI), and digital twins, which collectively enable the synergy between humans, machines, and data. The paper presents recent trends in robotization and digital integration within automotive manufacturing, accompanied by an overview of national policies and investment priorities. Findings reveal that China leads in absolute vehicle output and robot installations, the United States focuses on highly automated and digitally connected production systems, while India is rapidly developing its capacities through selective and adaptive implementation of Industry 4.0 technologies. The study concludes that differing approaches to digital transformation are shaping unique models of competitiveness, technological sovereignty, and sustainable development in the automotive industry.
Key Words: Industry 4.0, automotive industry, robotics, automation, smart manufacturing, China, India, United States

1. Uvod

Industrija 4.0 predstavlja najznačajniju transformaciju proizvodnih sistema u savremenoj historiji industrijalizacije. Ovaj koncept, utemeljen na integraciji digitalnih, fizičkih i bioloških sistema, redefinira načine na koje se proizvodi dizajniraju, izrađuju i plasiraju na tržište. U kontekstu automobilske industrije, Industrija 4.0 donosi duboke promjene kroz primjenu kiber-fizičkih sistema (CPS), Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), digitalnih blizanaca i robotike, čime se povećava produktivnost, efikasnost i prilagodljivost proizvodnih procesa [1-3]. Digitalizacija i automatizacija omogućavaju prelazak s tradicionalne masovne proizvodnje na pametne, umrežene i visoko prilagodljive proizvodne lance. Ovi trendovi nisu samo tehnološke inovacije, već i strateški instrumenti nacionalne konkurentnosti, posebno u sektorima sa visokom dodanom vrijednošću kao što je automobilska industrija [4-6]. Globalna automobilska industrija suočava se s trostrukim izazovom – digitalnom transformacijom proizvodnje, tranzicijom ka održivoj mobilnosti i promjenom globalnih lanaca vrijednosti. U tom kontekstu, primjena principa Industrije 4.0 postaje odlučujući faktor koji razlikuje vodeće proizvođače od onih u fazi prilagođavanja. Industrijska robotika, kao centralna tehnologija ove revolucije, omogućava visok stepen automatizacije, preciznosti i fleksibilnosti, što je posebno važno u procesima montaže, zavarivanja, lakiranja i kontrole kvaliteta [7, 8]. Prema podacima International Federation of Robotics (IFR),

automobilska industrija kontinuirano bilježi najveću gustinu robotizacije na globalnom nivou, čime postaje prirodno okruženje za proučavanje učinaka Industrije 4.0. Odabir Kine, Indije i Sjedinjenih Američkih Država kao slučajeva za analizu temelji se na njihovom komplementarnom položaju u globalnoj industrijskoj hijerarhiji. Kina predstavlja svjetskog lidera u apsolutnom obimu proizvodnje vozila i instalacijama industrijskih robota, uz snažnu državnu podršku inicijativama tehnološke automatizacije [9,10]. Sjedinjene Američke Države ističu se tehnološkim inovacijama, razvojem pametnih fabrika i integracijom IoT i AI tehnologija u visokoautomatizovanim proizvodnim sistemima [2]. Nasuprot tome, Indija zauzima poziciju brzorastućeg tržišta u fazi ubrzane digitalne transformacije, gdje selektivna implementacija tehnologija Industrije 4.0 ima za cilj povećanje produktivnosti i modernizaciju tradicionalnih proizvodnih kapaciteta. Glavna istraživačka pitanja koja se postavljaju u ovom radu jesu: (1) Kako se tehnologije Industrije 4.0 implementiraju u automobilskim industrijama Kine, Indije i Sjedinjenih Američkih Država?; (2) Koje su razlike u intenzitetu primjene industrijskih robota i pametnih tehnologija između ovih zemalja?; (3) U kojoj mjeri nacionalne strategije digitalne transformacije doprinose konkurentnosti i održivosti automobilskog sektora? Cilj rada je da pruži komparativnu analizu stepena integracije tehnologija Industrije 4.0 i da identifikuje obrasce koji određuju uspjeh ili ograničenja u njihovoj implementaciji. Fokus je stavljen na robotiku kao centralnu komponentu, ali se analizira i širi kontekst digitalne infrastrukture, obrazovne osnove i investicijskih politika koje podržavaju tehnološku transformaciju.

Metodološki okvir rada zasniva se na kombinaciji deskriptivne, komparativne i longitudinalne analize. Korišćeni su statistički podaci iz relevantnih međunarodnih izvora, uključujući International Federation of Robotics (IFR), Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA), te nacionalne baze podataka i industrijske izvještaje. Također, koristi se literaturna analiza načelnih studija (peer-review), sa posebnim osloncem na radove koji istražuju robotiku, AI i primjenu pametne proizvodnje u automobilskim pogonima [11-13]. Analiza obuhvata kvantitativne pokazatelje proizvodnje vozila i gustine robotizacije (broj robota na 10.000 zaposlenih), kao i kvalitativne pokazatelje koji se odnose na politike inovacija i digitalizacije. Struktura rada organizovana je u nekoliko tematskih cjelina.

Nakon ovog uvodnog dijela, drugo poglavlje pruža teorijski okvir i pregled ključnih tehnologija Industrije 4.0, s posebnim naglaskom na robotiku kao jezgro pametne proizvodnje. Treće poglavlje objašnjava metodologiju istraživanja i izvore podataka. U naredna tri poglavlja analiziraju se pojedinačne studije slučaja: Kina, Sjedinjene Američke Države i Indija. Sedmo poglavlje donosi komparativnu diskusiju i poređenje ključnih pokazatelja. Na kraju, zaključak sintetizuje glavne nalaze i ukazuje na buduće pravce istraživanja u kontekstu digitalne transformacije globalne automobilske industrije.

2. Teorijski okvir i konceptualne osnove Industrije 4.0

Industrija 4.0 (4IR – Fourth Industrial Revolution) predstavlja novu eru u evoluciji proizvodnih sistema, u kojoj se granice između fizičkog i digitalnog svijeta sve više brišu. Temelji se na integraciji kiber-fizičkih sistema (Cyber-Physical Systems, CPS), robotska tehnologija, interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), velike količine podataka (Big Data), simulacije i digitalnih blizanaca, automatizacije i robotike.

Ove tehnologije omogućavaju proizvodnim pogonima da postanu pametni, fleksibilni, samoregulirajući, realno-vremenski reagirajući i efikasni u potrošnji resursa, te da bolje odgovore na zahtjeve tržišta i održivosti.

2.1. Definicija i evolucija Industrije 4.0

Industrija 4.0 definira se kao koncept koji objedinjuje moderne digitalne tehnologije i proizvodne procese radi automatizacije, povezanosti, vizualizacije i autonomnog upravljanja. CPS i IoT omogućavaju razmjenu podataka između mašina, korisničkih uređaja i infrastrukture; AI i mašinsko učenje pružaju sposobnost analiziranja tih podataka i donošenja odluka; digitalni blizanci doprinose simulaciji i predikciji ponašanja sistema u realnom vremenu. Evolucija počinje od prvih industrijskih revolucija (parna mašina, električna energija, automatizacija i informatizacija), do sadašnje faze u kojoj je ključna povezanost, interoperabilnost i adaptivnost [14].

2.2. Ključne tehnologije Industrije 4.0

- Kiber-fizički sistemi (CPS): integracija fizičkih uređaja i softverskih sistema kako bi se omogućilo praćenje i kontrola proizvodnih procesa u realnom vremenu.
- Robotska tehnologija: uključuje primjenu industrijskih, kolaborativnih i mobilnih robota za automatizaciju proizvodnih i logističkih procesa. Roboti u Industriji 4.0 karakterizirani su visokom preciznošću, adaptivnošću i mogućnošću interakcije s ljudima i drugim mašinama putem naprednih senzora i AI algoritama. Njihova integracija doprinosi povećanju produktivnosti, smanjenju grešaka i poboljšanju sigurnosti na radnom mjestu.
- Internet stvari (IoT): senzori, uređaji, strojevi – međusobno povezani, prikupljaju podatke i šalju u analitiku; omogućava praćenje, upravljanje resursima, održavanje i automatizaciju.

Umjetna inteligencija (AI) i mašinsko učenje: analitika podataka, prediktivna održavanja, optimizacija procesa i odlučivanje; AI je omogućio autonomne sustave i poboljšanje fleksibilnosti proizvodnje.

- Digitalni blizanci i simulacija: kreiranje virtualnih modela proizvodnih sistema ili pojedinačnih strojeva; omogućaju testiranje i optimizaciju bez prekida realnog procesa.
- Big Data i analitika u realnom vremenu: obrada velikog obima podataka dolazi od senzora, IoT, proizvodnih procesa; upotreba analitike za unapređenje kvaliteta, otkrivanje kvarova, smanjenje otpada i efikasnije korištenje energenata.

Literatura ukazuje da je svaka od ovih tehnologija zasebno predmet istraživanja i implementacije, a da je uspješna integracija svih njih u celovit sistem ključna za pun potencijal Industrije 4.0 [15, 16].

2.3. Uloga robotike i automatizacije u transformaciji proizvodnje

Robotika čini srž automatizacije u Industriji 4.0 — industrijski roboti, kolaborativni roboti, autonomni robotski sistemi i automatizovani radni tokovi. Primjena robotike omogućava visok stepen preciznosti, konzistentnosti, smanjenje grešaka, bržu proizvodnju i minimalizaciju ljudskog faktora u opasnim ili ponavljajućim zadacima. Robotika uz IoT i AI postiže prediktivno održavanje i adaptivne proizvodne linije. Također, robotika se koristi kao instrument za povećanje efikasnosti energije, smanjenje otpada i poboljšanje kvaliteta – čime se robotika direktno povezuje ne samo s produktivnošću nego i s ciljevima održivosti. Jedan pregled dokumentuje napredak u sistemima robotike u kontekstu pametne proizvodnje, te izazove kao što su interoperabilnost, sigurnost, održavanje i kvalifikacije radne snage za rad u robotski automatizovanim sistemima [17].

2.4. Povezanost Industrije 4.0 i održivog razvoja u automobilskoj industriji

Industrija 4.0 nije samo tehnološka paradigma; ona ima snažne veze s održivim razvojem - ekološkim, ekonomskim i socijalnim dimenzijama. U automobilskoj industriji, implementacija tehnologija kao što su IoT, AI, robotika i digitalni blizanci doprinosi smanjenju potrošnje energije, optimizaciji materijala, smanjenju otpada i emisija, te boljem upravljanju resursima kroz održavanje u realnom vremenu. Također ima uticaj na ekonomske dimenzije kroz povećanje produktivnosti i konkurentnosti, te socijalne kroz stvaranje novih radnih mjesta u naprednim tehnologijama, dok istovremeno prelazi rizike automatizacije radnih zadataka. Pregled radova [17-19] pokazuje da je, iako literatura sve obuhvatnija, odnos između Industrije 4.0 tehnologija i održivih praksi još uvijek djelomično fragmentiran, sa značajnim prostorom za istraživanje u automobilskoj industriji.

3. Metodologija i izvori podataka

3.1. Komparativni pristup i izbor indikatora

Za analizu industrijske robotizacije u automobilskoj industriji primijenjen je komparativni pristup koji omogućava usporedbu različitih zemalja i regija na temelju

ključnih indikatora. Ovaj pristup omogućava identifikaciju obrazaca, trendova i varijacija u robotizaciji proizvodnje vozila.

Odabrani indikatori uključuju godišnju proizvodnju vozila, broj instaliranih industrijskih robota, gustinu robotizacije (broj robota na 10.000 zaposlenih) te integraciju pametnih tehnologija i politika digitalizacije. Ovi pokazatelji omogućuju sveobuhvatan uvid u razinu automatizacije i digitalizacije u automobilskoj industriji.

3.2. Izvori podataka

Podaci za analizu prikupljeni su iz renomiranih izvora:

- Međunarodna federacija robotike (IFR): Pruža globalne statistike o industrijskim robotima, uključujući broj instalacija, gustoću robotizacije i tržišne analize [20].
- Međunarodna organizacija proizvođača motornih vozila (OICA): Nudi podatke o godišnjoj proizvodnji vozila po zemljama i regijama [21].
- Nacionalne baze podataka: Pružaju specifične informacije o industrijskoj robotizaciji i proizvodnji vozila na nacionalnoj razini.
- Akademska literatura: Služi kao sekundarni izvor za razumijevanje teorijskih okvira i prethodnih istraživanja u području robotizacije i digitalizacije automobilske industrije.

3.3. Kriteriji za procjenu

- Godišnja proizvodnja vozila

Ovaj indikator mjeri ukupnu proizvodnju vozila u određenoj godini, pružajući uvid u veličinu i kapacitet automobilske industrije u različitim zemljama. Podaci se prikupljaju od OICA-e i nacionalnih statističkih ureda [21]. U kontekstu globalne proizvodnje vozila, u analiziranim zemljama: Kina, Sjedinjene Američke Države, i Indija, prikazana je u tabeli 1. Tabela 1 prikazuje godišnju proizvodnju vozila u ovim državama za 2023. godinu i ukupnu svjetsku proizvodnju.

Tabela 1. Proizvodnja motornih vozila u Kini, USA,Indiji i Svijetu u (2024)

Zemlja	Proizvedena vozila (2024)
Kina	31.281.592
Sjedinjene Američke Države	10.562.198
Indija	6.014.692
Ukupno u svijetu	93.546.599

Izvor: OICA (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers), 2024

- Broj instaliranih industrijskih robota

Ovaj kriterij ocjenjuje broj industrijskih robota instaliranih u proizvodnim pogonima. Podaci se temelje na izvještajima IFR-a, koji pružaju detaljne statistike o instalacijama robota po zemljama i industrijama. U tabeli 2 prikazana je imple-

mentacija industrijskih robota u zemljama: Kina, Sjedinjene Američke Države, i Indija, kao i ukupna implementacija u svijetu [22].

Tabela 2. Implementacija industrijskih robota u Kini, USA,Indiji i svijetu u (2024)

Zemlja	Implementacija industrijskih robota (2024)
Kina	295.000
Sjedinjene Američke Države	34.000
Indija	9.100
Ukupno u svijtu	541.000

- Gustina robota na 10.000 zaposlenih u industriji

Gustina robotizacije mjeri broj robota na 10.000 zaposlenih u industriji, što omogućava usporedbu razine automatizacije među različitim zemljama.

U tabeli 3 prikazana je implementacija industrijskih robota na 10.000 zaposlenih radnika u industriji u zemljama: Kina, Sjedinjene Američke Države, i Indija, kao implementacija u svijetu. Ovi podaci također dolaze iz [23, 24].

Tabela 3. Gustina industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u industriji u Kini, USA,Indiji i svijetu u (2023)

Zemlja	Implementacija industrijskih robota na 10.000 zaposlenih radnika u industriji (2023)
Kina	470
Sjedinjene Američke Države	295
Indija	10
Ukupno prosjek u svijtu	162

- Integracija pametnih tehnologija i politika digitalizacije

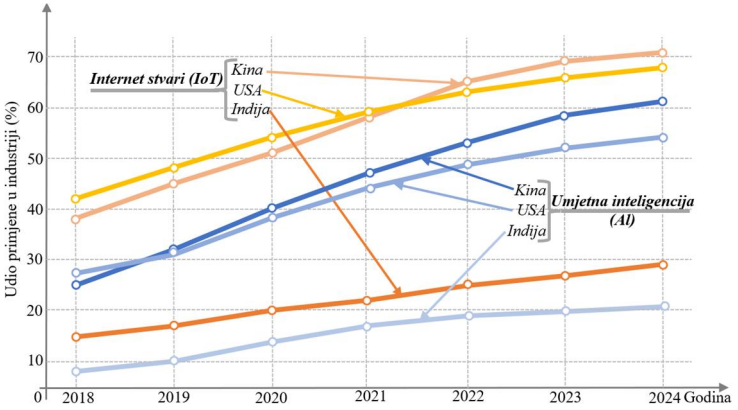
Ovaj indikator procjenjuje stupanj integracije pametnih tehnologija, poput Interneta stvari (IoT), umjetničke inteligencije (AI) i digitalnih platformi u proizvodne procese. Integracija pametnih tehnologija predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja stepena digitalne transformacije savremene industrije.

Ona obuhvata primjenu Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI), u proizvodnim procesima. Ovi elementi zajedno čine osnovu pametne industrije i omogućavaju optimizaciju proizvodnje, smanjenje troškova, prediktivno održavanje i povećanje fleksibilnosti sistema.

Tabela 4. Indikatori procjene stupnja integracije pametnih tehnologija (2024)

Indikator	SAD	Kina	Indija	Izvor / Napomena
Udio pametnih fabrika u ukupnoj industriji (%)	38%	42%	17%	PwC (2023); OECD (2024)
Primjena IoT sistema u proizvodnim linijama (%)	68%	71%	29%	McKinsey (2023); IFR (2024)
Primjena AI i prediktivne analitike u proizvodnji (%)	54%	61%	21%	WEF (2024); Statista (2024)
Investicije u digitalnu infrastrukturu (mlrd. USD)	125	210	27	IMF Digital Economy Report (2024)
Broj pametnih industrijskih zona / klastera	48	62	22	UNIDO (2024)
Ulaganja u R&D (% BDP-a)	3.5%	2.6%	0.9%	OECD (2024)
Broj industrijskih IoT uređaja (mil.)	1,150	1,460	310	Statista (2024)
Razina digitalne zrelosti industrije (skala 1–5)	4.6	4.4	3.1	Deloitte Industry 4.0 Index (2024)

Procjena integracije pametnih tehnologija u industriju provodi se kombinacijom kvantitativnih i kvalitativnih metoda, koristeći podatke iz međunarodnih baza [25-28] i [29-32], te iz nacionalnih strategija digitalizacije. Poseban naglasak stavlja se na razvoj politika koje povezuju javni i privatni sektor, potiču ulaganja u istraživanje i razvoj (R&D), te razvijaju digitalne kompetencije radne snage. U tabeli 4 su prikazani indikatori procjene stupnja integracije pametnih tehnologija (2024).



Slika 1. Trend rasta integracije IoT i Al tehnologija u industriji (2018-2024)

Poređenje prikazano u tabeli 4 i na slici 1 pokazuje da Kina i Sjedinjene Američke Države prednjače u globalnoj integraciji pametnih tehnologija, iako se njihovi modeli značajno razlikuju [25-28] i [29-32]. SAD se oslanja na tržišno vođene inovacije i snažan privatni sektor, dok Kina primjenjuje državno planiranje i

nacionalne razvojne programe. Indija je u fazi konsolidacije digitalne infrastrukture, ali pokazuje visoku stopu rasta i izražen potencijal za ubrzani napredak.

Podaci i trendovi ukazuju da Kina i SAD dominiraju u implementaciji pametnih tehnologija, ali kroz različite pristupe:

- Sjedinjene Američke Države ulažu u decentralizovane inovacijske ekosisteme, pri čemu privatni sektor ima ključnu ulogu u procesu digitalne transformacije.
- Kina primjenjuje strateški državni pristup, masovno implementira 5G tehnologiju, razvija domaće AI čipove i predvodi u globalnoj implementaciji Interneta stvari (IoT).
- Indija ostvaruje napredak kroz inicijative usmjerene na digitalizaciju sektora malih i srednjih preduzeća, oslanjajući se na međunarodna partnerstva i snažnu IT outsourcing bazu.

Kumulativni podaci ukazuju na prelazak iz faze digitalne implementacije u fazu inteligentne industrijske optimizacije, u kojoj AI i IoT više ne predstavljaju podršku, već postaju integralni dio poslovne logike. Sve tri zemlje jasno pokazuju da digitalne politike i ulaganja u istraživanje i razvoj (R&D) imaju presudnu ulogu u jačanju konkurentnosti i industrijske otpornosti. Ipak, Kina sve više preuzima vodeću ulogu u globalnoj digitalnoj ekonomiji zahvaljujući kombinaciji koherentne industrijske strategije i tehno-ekonomske sinergije.

4. Kina: Globalni lider u automatizaciji i pametnoj proizvodnji

Trendovi u proizvodnji vozila i ulaganjima u automatizaciju

Kina je tokom proteklih osam godina učvrstila svoju poziciju globalnog lidera u proizvodnji vozila i implementaciji robotskih tehnologija. Kao najveći svjetski proizvođač automobila, ona ostvaruje značajan udio u ukupnoj globalnoj proizvodnji vozila, dok istovremeno postaje najveće tržište i proizvođač industrijskih robota.

Ovaj dvostruki rast odražava strateško usklađivanje Kine s konceptom Industrije 4.0, u kojem su automatizacija, razmjena podataka i napredne tehnologije proizvodnje ključni elementi. Međutim, tržište automatizacije suočava se s izazovima, uključujući smanjenje rasta u 2024. godini, što zahtijeva prilagodbu strategija i inovacija [33].

Nacionalne strategije: „Made in China 2025“ i „New Generation Al Plan“

Podstaknuta nacionalnim strateškim inicijativama, kao što su Made in China 2025 i njeni nasljedni programi, Kina intenzivno sprovodi implementaciju tzv. „omogućavajućih tehnologija“ - robotike, Interneta stvari (IoT), velikih podataka (Big Data), vještačke inteligencije (AI), digitalnih blizanaca (Digital Twins) i 5G

mreža. Kineski proizvođači automobila (BYD, Geely, SAIC i dr.) značajno ulažu u robotizirane proizvodne linije koje integriraju fizičku proizvodnju s digitalnim sistemima nadzora i upravljanja, čime se povećava brzina reakcije, fleksibilnost i kontrola kvaliteta. „New Generation AI Plan“ usmjeren je na razvoj naprednih thenologija poput umjetničke inteligencije, s ciljem integracije AI u različite industrijske sektore, uključujući proizvodnju. Ove strategije omogućavaju Kinu da postigne visoku digitalnu zrelost i konkurentnost na globalnom tržištu [34,35]

Godišnja proizvodnja vozila i uloga kolabarativnih robota u automobilskom sektoru

Proizvodnja motornih vozila u Kini varirala je u skladu s globalnim tržišnim kretanjima. Nakon dostizanja vrhunca neposredno prije pandemije COVID-19, sektor je zabilježio pad tokom 2018-2019. godine, a zatim i izraženiji pad u 2020. godini usljed globalnih poremećaja izazvanih pandemijom. Od 2021. godine proizvodnja se postepeno oporavlja, dostižući ili blago premašujući ranije maksimalne nivoe tokom perioda 2023-2024. godine, kako pokazuje tabela 5.

U tabeli 5 prikazan je trend implementacije industrijskih robota na godišnjem nivou u Kini, kao i implementacija industrijskih robota u automobilskom sektoru u posljednjih osam godina [20-23, 36–38].

Na osnovu podataka prikazani u tabeli 5 zaključujemo da se iz godine u godinu implementacija industrijskih robota povećava u svim industrijskim granama, a i u automobilskoj industriji.

Table 5. Proizvodnja vozila i instalacija industrijskih robota u Kini (2017–2024)

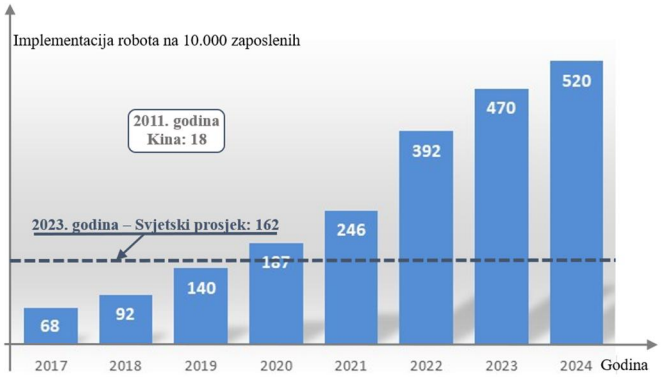
Godina	Proizvodnja vozila (miliona)	Implementacija industrijskih robota (jedinica)	Implementacija industrijskih robota u autobilskoj inudtriji (jedinica)
2017	~29.0	138.000	42.000
2018	~28.1	154.000	39.000
2019	~25.7	140.000	31,000
2020	~25.2	168.000	30.000
2021	~26.1	243.000	58.000
2022	~27.0	290,000	73.000
2023	~28.3	276.000	65.000
2024	~30.0	295.000	57.000

U 2017. godini u Kini je implementirano 138.000 jedinica robota, a osam godina kasnije u 2024 godini implementirano 295.000 jedinica robota što predstavlja 54% od implementiranih industrijskih robota u svijetu. Kina je u svijetu lider po imple-

mentaciji industrijskih robota. Ovi roboti omogućavaju visoku preciznost i efikasnost u montaži, zavarivanju i lakiranju vozila. Kolaborativni roboti (cobots) također igraju značajnu ulogu u saradnji s ljudskim radnicima, povećavajući fleksibilnost i sigurnost proizvodnih linija [39].

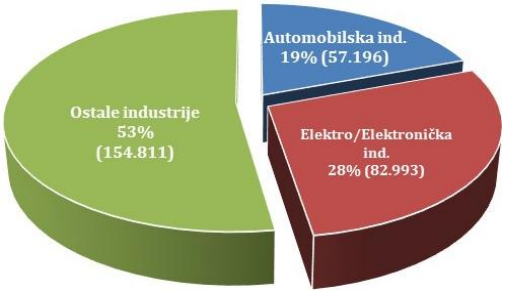
Distribucija robota po industrijskim sektorima

Na osnovu prikazanih podataka na slici 2 može se zaključiti da je Kina od 2020. godine već premašila globalni prosjek u pogledu implementacije industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnji [20-23, 36–38].



Slika 2. Trend gustine industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u Kini u periodu 2017–2024.

Dok je 2011. godine gustina robota u Kini iznosila svega 18 jedinica, do 2024. godine zemlja je dostigla treće mjesto na globalnoj ljestvici sa 520 jedinica na 10.000 zaposlenih, odmah iza Republike Koreje (prvo mjesto, 1.012 jedinica) i Singapura (drugo mjesto, 770 jedinica). Očekuje se da će ovaj trend rasta implementacije industrijskih robota u Kini imati dalji uzlazni tok.



Slika 3. Trend implementacije industrijskih robota u automobilskoj, električnoj/elektronskoj i drugim industrijama u Kini tokom 2024. godine

Prema podacima po industrijskim granama prikazanih na slici 3, sektor električne i elektronske industrije ostaje najveći korisnik robota u Kini; tokom 2024. godine instalirano je 82.993 jedinica (28%). Automobilska industrija slijedi sa oko 57.196 jedinica (19%) [22]. Domaći proizvođači robota sve više osvajaju tržišni udio, ne samo u snabdijevanju automobilske industrije, već i u širem spektru kineske proizvodnje.

Trendovi robotizacije u automobilskoj industriji

Tokom proteklih osam godina, gustina robota u kineskoj automobilskoj industriji značajno je porasla, prateći globalne trendove. Udio instalacija robota u automobilskoj industriji u ukupnim svjetskim brojkama ostaje značajan, što pokazuje da ovaj sektor i dalje predstavlja osnovu primjene robotike. Sve veće usvajanje kolaborativnih robota (cobots), sistema kontrole kvaliteta zasnovanih na vještačkoj inteligenciji (AI), digitalnih blizanaca (digital twins) i automatiziranih lanaca snabdijevanja ukazuje na istovremeni kvantitativni rast i kvalitativno unapređenje [40–43].

Kineska razvojna putanja tokom posljednjih osam godina jasno pokazuje da su rast proizvodnje vozila i implementacija robotike međusobno povezani i uzajamno podsticajni procesi. Kontinuiranim ulaganjima u robotiku i tehnologije Industrije 4.0, Kina ne samo da širi svoje proizvodne kapacitete, već i podiže tehnološke standarde automobilske industrije, čime se pozicionira kao globalna industrijska sila i vodeći svjetski akter u oblasti automatizacije.

5. Sjedinjene Američke Države: Digitalna integracija i tehnološka konvergencija

Trendovi u proizvodnji vozila i ulaganjima u automatizaciju

Sjedinjene Američke Države (SAD) predstavljaju globalnog lidera u digitalnoj transformaciji proizvodnje, naročito u automobilskoj industriji, gdje su kompanije kao što su General Motors (GM), Ford i Tesla usmjerile znatna ulaganja u automatizaciju i digitalne proizvodne procese. Ove kompanije su među prvima implementirale napredne robotske sisteme, autonomne montažne linije i digitalno upravljane procese koji omogućavaju veći stepen fleksibilnosti i preciznosti u proizvodnji [43].

Tesla, primjerice, koristi visoko automatizirane sisteme za zavarivanje i lakiranje karoserija, dok GM primjenjuje robotiku i analitiku podataka kako bi optimizirao tok materijala i smanjio zastoje u proizvodnji [45]. Time SAD postaju primjer uspješne sinergije između tradicionalne industrijske proizvodnje i digitalnih tehnologija, čime se postiže povećanje produktivnosti i kvaliteta proizvoda.

Nacionalne politike (Advanced Manufacturing Initiative, Smart Manufacturing Leadership Coalition)

Na nacionalnom nivou, razvoj pametne proizvodnje u SAD-u je institucionalno podržan kroz programe kao što su Advanced Manufacturing Initiative, Manufacturing USA, i Smart Manufacturing Leadership Coalition - SMLC. Ovi programi promovišu saradnju između industrije, akademske zajednice i vladinih institucija kako bi se ubrzala implementacija naprednih tehnologija u proizvodne procese.

Američko Ministarstvo trgovine i Ministarstvo energetike podržavaju projekte koji uključuju razvoj digitalnih blizanaca, vještačke inteligencije (AI), Interneta stvari (IoT) i 5G infrastrukture s ciljem unapređenja proizvodne efikasnosti [45]. Programi poput Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute – CESMII, podstiču kompanije da koriste pametne senzore, analitiku i automatizovane kontrolne sisteme, čime se smanjuje potrošnja energije i optimizuju procesni parametri [46].

Godišnja proizvodnja vozila i uloga kolobarotivnih robota u automobilskom sektoru

Automobilska industrija u Sjedinjenim Američkim Državama istorijski je predstavljala centralni pokretač industrijske automatizacije.

Tabela 6. Proizvodnja vozila i instalacija industrijskih robota u Sjedinjenim Američkim Državama (2017–2024)

Godina	Proizvodnja vozila (miliona)	Implementacija industrijskih robota (jedinica)	Implementacija industrijskih robota u autobilskoj inudtriji (jedinica)
2017	~11.19	36.437	12.524
2018	~10.99	40.373	14.472
2019	~10.53	33.378	12.870
2020	~8.82	31.000	10.500
2021	~9.17	39.987	9.782
2022	~10.06	40.576	14.467
2023	~10.61	38,303	12.283
2024	~11.21	34.000	13.700

Proizvodnja vozila u zemlji pokazuje ciklične varijacije koje su u velikoj mjeri pod uticajem globalnih ekonomskih kretanja, poremećaja u lancima snabdijevanja i promjena u domaćoj potražnji. Trendovi u godišnjim instalacijama robota ilustruju sve veću oslonjenost na automatizaciju kako u automobilskoj, tako i u neautomobilskoj industriji.

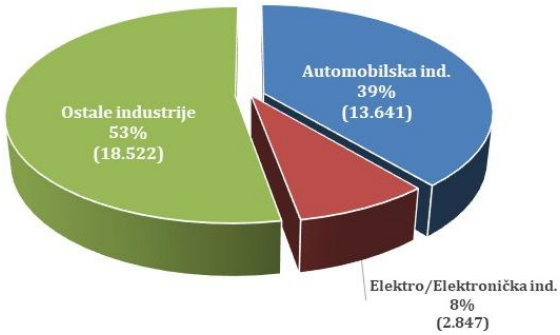
Tabela 6 prikazuje podatke o proizvodnji vozila, ukupnim godišnjim instalacijama robota i instalacijama robota isključivo u automobilskoj industriji za period 2017–2024 [20-23, 36–38]. Kao što je prikazano u tabeli, ukupne instalacije robota dostigle su vrhunac 2018. godine, sa više od 40.000 jedinica, prije nego što su zabilježile pad tokom 2019. i 2020. godine zbog trgovinskih tenzija i pandemije COVID-19. Faza oporavka započela je 2021. godine, podržana povećanom potražnjom za automatizacijom u različitim industrijskim sektorima. Iako automobilska industrija i dalje dominira u primjeni robota, druge grane poput elektronike, obrade metala, plastike i hemijske industrije bilježe rastući udio u ukupnim instalacijama. Posebno su 2022. i 2023. godina označile značajan oporavak, s brojem instalacija koji je premašio 40.000 jedinica, što ukazuje na obnovljene investicije u tehnologije automatizacije.Industrijski roboti imaju ključnu ulogu u transformaciji američke automobilske industrije. U posljednjoj deceniji bilježi se snažan porast upotrebe kolaborativnih robota (cobots) koji omogućavaju direktnu saradnju čovjeka i mašine, čime se povećava sigurnost i produktivnost radnika [47]. Ford i GM koriste kolaborativne robote u procesima sklapanja motora i završne montaže, dok Tesla razvija vlastite robotske platforme za visokoprecizne zadatke, uključujući autonomno testiranje komponenti i AI-baziranu kontrolu kvaliteta [43]. Napredak u AI analitici, senzorici i digitalnim blizancima omogućava sve veći stepen integracije fizičkih i virtuelnih sistema, što doprinosi povećanju preciznosti i prediktivnom održavanju mašina.

Distribucija robota po industrijskim sektorima

Pored apsolutnog broja instalacija, pokazatelj gustine robota - izražen kao broj robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnji - pruža uvid u strukturni nivo automatizacije. Slika 4. prikazuje razvoj gustine robota u Sjedinjenim Američkim Državama u periodu od 2017. do 2024. godine.

Slika 4. Trend gustine industrijskih robota na 10.000 zaposlenih u USA u periodu 2017–2024.

Kao što je prikazano na slici 4, gustina robota u Sjedinjenim Američkim Državama kontinuirano raste, povećavajući se sa 200 jedinica na 10.000 zaposlenih u 2017. godini na procijenjenih 312 jedinica u 2024. godini [20-23, 36–38]. Najizraženiji rast zabilježen je između 2019. i 2021. godine, uglavnom zato što su kompanije ubrzale procese automatizacije kao odgovor na nedostatak radne snage i poremećaje u proizvodnji izazvane pandemijom. Ovaj trend naglašava strateški značaj industrijske robotike za očuvanje konkurentnosti i otpornosti američke proizvodnje.



Slika 5. Trend implementacije industrijskih robota u automobilskoj, električnoj/elektronskoj i drugim industrijama u USA tokom 2024. godine

Struktura instalacija u SAD-u pokazuje koncentraciju u nekoliko ključnih sektora: automobilskoj industriji (najveći pojedinačni udio), industriji elektronike i električnih proizvoda, obradi metala i mašinskom inženjerstvu te industriji plastike i hemikalija. Udio automobilske industrije u ukupnim instalacijama varira, ali je u većini godina iznosio trećinu ili više od ukupnog broja novih instalacija kao što pokazuje slika 5. u 2024 godini [22]. Paralelno s tim, raste primjena robota u sektoru elektronske proizvodnje zbog povećane potražnje za preciznošću i većom proizvodnjom elektronskih komponenti za električna vozila (EV) i elektroniku općenito.

Ukupno posmatrano, struktura instalacija robota u 2024. godini ukazuje na dvije ključne dinamike:

- Kvantitativna ekspanzija – automobilska industrija predvodi većinu instalacija.
- Kvalitativna transformacija – primjene robotike postaju sve sofisticiranije kroz upotrebu kolaborativnih robota (cobota), integraciju vještačke inteligencije u vizuelnoj inspekciji i kontroli kvaliteta te razvoj automatizovanih proizvodnih ćelija prilagođenih potrebama proizvodnje električnih vozila.

Ovi procesi ističu centralnu ulogu robotike u očuvanju konkurentnosti američke proizvodnje, ali i sektorske promjene koje odražavaju širu tehnološku i industrijsku transformaciju.

Trendovi u robotici u automobilskoj industriji

Automobilska industrija u Sjedinjenim Američkim Državama pokazuje nekoliko jasnih trendova [48–50]:

- Kontinuiranu modernizaciju proizvodnih linija kroz zamjenu ili nadogradnju tradicionalnih robota naprednijim sistemima sposobnim za fleksibilnu proizvodnju.
- Povećanu upotrebu kolaborativnih robota (cobota) za zadatke koji zahtijevaju finu manipulaciju i montažu.
- Integraciju vještačke inteligencije u procese vizuelne inspekcije i kontrole kvaliteta.
- Rast instalacija robota povezan s tranzicijom ka električnim vozilima, koja zahtijeva nove procese sklapanja i automatizovane proizvodne ćelije.

Ovi trendovi ukazuju ne samo na kvantitativni porast broja robota, već i na značajno povećanje tehnološke sofisticiranosti njihovih primjena. Američki automobilski i širi proizvodni sektor intenzivno implementira ključne tehnologije Industrije 4.0, uključujući industrijske robote, IoT senzore i platforme, analitiku proizvodnje zasnovanu na velikim podacima (Big Data), digitalne blizance (Digital Twins) i algoritme umjetne inteligencije za vizuelnu inspekciju i optimizaciju procesa. Proizvođači automobila i njihovi dobavljački lanci ulažu u fleksibilne, modularne proizvodne ćelije koje integrišu robote sa naprednim sistemima za kontrolu i nadzor u realnom vremenu. Ovakva integracija omogućava bržu prilagodbu novim modelima i varijantama vozila, skraćuje vrijeme podešavanja i poboljšava dosljednost kvaliteta.

6. Indija: Selektivna implementacija i tehnološki napredak

Trendovi u proizvodnji vozila i ulaganjima u automatizaciju

Indija je tokom posljednjih godina doživjela značajan porast proizvodnje vozila, usljed jakih domaćih i izvozačkih potražnji, kao što su tržišta električnih vozila (EV) i komponenti za automobile. Kompanije poput Tata Motors, Mahindra & Mahindra, Maruti Suzuki i drugih ulažu u modernizaciju proizvodnih pogona, automatizaciju i digitalizaciju procesa, uključujući robotiku, IoT senzore, AI-basirane sustave za kontrolu kvaliteta, te digitalne blizance [51]. Međutim, robotizacija se dešava selektivno - najintenzivnije u velikim grupama automobilske proizvodnje i dijelova, dok se manje kompanije i dalje oslanjaju na tradicionalnije metode proizvodnje.

Nacionalne politike implementacije Industrije 4.0

Indijska vlada je pokrenula nekoliko ključnih politika i programa s ciljem poticanja Industrije 4.0, robotizacije i povećanja konkurentnosti manufakture. Među

najistaknutijima su Make in India, Production Linked Incentive (PLI) Scheme, i Nacionalna politika elektronike. Ove politike nude porezne olakšice, subvencije, standardizaciju, poticanje domaće proizvodnje, kao i olakšavanje uvođenja digitalnih tehnologija u industrijske pogone [52]. Postoje i inicijative za osposobljavanje radne snage u digitalnim vještinama, posebno u sektoru automobilske proizvodnje, gdje je potreban veći broj tehničara za upravljanje automatizovanim i robotiziranim linijama.

Godišnja proizvodnja vozila i uloga kolaborativnih robota u automobilskom sektoru

Iako su precizne godišnje brojke proizvodnje vozila u posljednje tri-četiri godine dostupne, najznačajniji pokazatelj je rast u broju instalacija robota u automobilskoj industriji. Često se primjenjuju kolaborativni roboti (coboti) u zadacima poput zavarivanja, montaže, lakiranja, brušenja, vizuelnih aplikacija i kontrole kvaliteta; primjer je kompanija Bajaj Auto koje je instaliralo blizu 120 robotskih ruku (kolaborativnih) u različitim pogonima za zadatke kao što su zavarivanje, vizija, i bolting [53]. Međutim, primjena industrijskih robota i dalje je skromna, s najvećom koncentracijom instalacija upravo u automobilskom sektoru. Kako zemlja unapređuje svoje inicijative „Make in India“ i „Digital India“**,** očekuje se da će integracija robotike i tehnologija Industrije 4.0 značajno ubrzati, smanjujući jaz između Indije i vodećih industrijskih nacija.

Tabela 7 prikazuje trendove u proizvodnji vozila i instalacijama industrijskih robota u Indiji u periodu od 2017. do 2024. godine [20-23, 36–38].

Tabela 7. Proizvodnja vozila i instalacije industrijskih robota u Indiji (2017–2024)

Godina	Proizvodnja vozila (miliona)	Implementacija industrijskih robota (jedinica)	Implementacija industrijskih robota u autobilskoj inudtriji (jedinica)
2017	~ 4,78	3.424	2.115
2018	~ 5,17	4.771	2.109
2019	~ 4,51	4.299	1.851
2020	~ 3,39	3.216	744
2021	~ 4,39	5.142	1.560
2022	~ 5,45	5.353	1.475
2023	~ 5,85	6.510	3.537
2024	~ 6,01	9.123	4.073

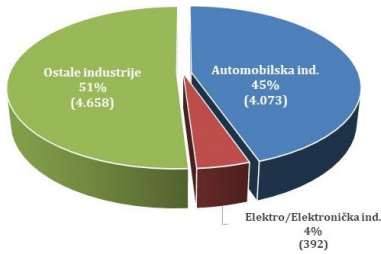
Proizvodnja vozila pokazuje ukupni rast sa približno 4,78 miliona jedinica u 2017. na 6,01 milion jedinica u 2024. godini, uprkos povremenim oscilacijama izazvanim pandemijom COVID-19 i poremećajima u lancima snabdijevanja. Prema

padacima iz tabele 7 u 2023. godini Indija je instalirala 6.510 industrijskih robota, od čega je automobilski sektor preuzeo oko 54,3%% instalacija (≈ 3.537 robota) [54]. U 2024. godini broj instalacija je porastao na 9.123 jedinica, a automobilski sektor je učestvovao sa ≈ 44,6% svih instalacija. U 2024., broj instalacija je porastao na 9.123 jedinica, a automobilski sektor je učestvovao sa ≈ 44,6% svih instalacija.

U automobilskom sektoru, instalacije robota su u početku bile niske, krećući se oko 2.000 jedinica, sa naglim padom na 744 jedinice u 2020. godini zbog prekida proizvodnje izazvanih pandemijom. Od 2021. godine nadalje, broj instalacija robota u automobilskoj industriji značajno je porastao, dostigavši 4.073 jedinice u 2024. godini, što ukazuje na ubrzanu modernizaciju i viši stepen integracije automatizacije u proizvodnim linijama. Sveukupno, tabela 7 naglašava dvostruku putanju Indije brzi rast proizvodnje vozila praćen postepenim, ali još uvijek skromnim usvajanjem industrijskih robota, posebno u automobilskom sektoru. Dok proizvodnja vozila u Indiji brzo raste, primjena industrijskih robota ostaje relativno ograničena, naročito u automobilskoj industriji. Nasuprot tome, implementacija robota u Indiji koncentrisana je uglavnom na automobilski i opšti industrijski sektor, što istovremeno ukazuje na mogućnosti za širenje i potrebu za ubrzanom industrijskom modernizacijom. Ukupno posmatrano, Indija predstavlja tržište u razvoju gdje rast proizvodnje znatno nadmašuje stepen automatizacije, što sugeriše značajan potencijal za buduća ulaganja u robotiku i tehnologije Industrije 4.0. U 2022. godini, Indija je imala gustinu robota od samo 7 jedinica na 10.000 zaposlenih u proizvodnom sektoru. Ovaj nivo je zanemarljiv u poređenju sa zemljama kao što su Kina, Sjedinjene Američke Države, zbog čega detaljna analiza trendova za period 2017–2024. godine ima ograničenu informativnu vrijednost.

Distribucija robota po industrijskim sektorima

Automobilski sektor dominira u distribuciji instalacija robota u Indiji. U 2023/2024, između 42-45% instalacija robota dolazi iz automobilske industrije [22,52]. Slijede sektori kao što su elektronika i električni uređaji, guma i plastika (rubber & plastics), te industrija metala (metalworking), koji bilježe rastući udio.



Slika 6. Trend implementacije industrijskih robota u automobilskoj, električnoj/elektronskoj i drugim industrijama u Indiji tokom 2024. godine

Iako su ti sektori još uvijek iza automobila po obimu, njihov rast pokazuje da se robotizacija širi van tradicionalnih automobilske domene [54, 55]. Slika 6 pokazuje da je u 2024. godini primjena industrijskih robota u Indiji najveća u sektoru opće industrije, sa instaliranih 4.658 jedinica, što odražava širenje primjene automatizacije izvan tradicionalnih sektora automobilske i elektronske industrije [35].

Automobilska industrija slijedi sa 4.073 robota, što ukazuje da proizvodnja vozila i dalje ostaje ključni pokretač industrijske automatizacije u zemlji. Sektor električne i elektronske opreme ima manji udio, sa 392 jedinice, što pokazuje da je primjena automatizacije u visokotehnološkoj proizvodnji još uvijek ograničena u poređenju s drugim industrijama.

Trendovi u robotici u automobilskoj industriji

Glavni trendovi u automobilskoj industriji Indije uključuju:

- Povećana primjena kolaborativnih robota (cobots): kompanije koriste robote koji rade u interakciji sa ljudskim radnicima za zadatke koji zahtijevaju preciznost i fleksibilnost [57].
- Integracija IoT, AI i digitalnih blizanaca u proizvodne procese radi optimizacije, prediktivnog održavanja i kontrole kvaliteta. Ovi trendovi su vidljivi u većim kompanijama koje imaju resurse da investiraju u „smart factory“ modele.
- Fokus na lokalnu proizvodnju komponenti automobilske industrije, što podstiče uvoz tehnologija robotike i automatizacije u pogone proizvođača komponenti, a ne samo kompletnih vozila.
- Rastuća gustoća robota, iako još uvijek značajno niža nego u vodećim državama: Indija ima još vrlo nizak broj robota po 10.000 zaposlenih u proizvodnji, što ukazuje da potencijal za rast postoji [54, 57].

7. Komparativna analiza i diskusija

Komparativna analiza između Kine, Indije i Sjedinjenih Američkih Država otkriva različite razvojne modele u pogledu automatizacije, robotizacije i digitalne transformacije industrije. Kina se pozicionirala kao globalni lider u implementaciji pametne proizvodnje zahvaljujući snažnim državnim strategijama poput „Made in China 2025“ i „New Generation AI Plan“, dok SAD prednjače u integraciji naprednih tehnologija kroz tržišno vođene inovacije i privatne investicije.

Indija, s druge strane, bilježi ubrzan rast u proizvodnji vozila, ali uz sporiju stopu implementacije automatizacije, što ukazuje na postepenu, selektivnu transformaciju industrije. Kina i SAD pokazuju visoku gustoću robota i kontinuiran rast produktivnosti, dok Indija zaostaje s tek nekoliko robota na 10.000 zaposlenih u proizvodnji.

U 2024. godini, Kina je premašila 295.000 novih robotskih instalacija, SAD oko 34.000, dok Indija bilježi oko 9.000, što odražava različite nivoe tehnološke zrelosti. Robotika u Kini i SAD-u ne samo da povećava produktivnost, već omogućava razvoj inovativnih modela proizvodnje - poput autonomnih fabrika i kolaborativnih sistema čovjek-mašina. U Indiji, primjena robota ima prvenstveno ulogu modernizacije, a ne još transformacije poslovnih modela.

Kada su u pitanju nacionalne strategije i modeli digitalne transformacije, SAD se oslanjaju na javno–privatne inicijative poput Advanced Manufacturing Initiative i Smart Manufacturing Leadership Coalition, dok Kina primjenjuje centralizovani pristup s fokusom na stratešku samodovoljnost. Indija kombinuje elemente oba modela kroz Make in India i Digital India.

Geopolitičke i ekonomske implikacije tehnološke diferencijacije, oblikuju globalne lance vrijednosti, gdje Kina jača svoju poziciju dobavljača naprednih tehnologija, dok SAD čuvaju prednost u istraživanju i softverskim rješenjima. Indija nastoji da smanji zavisnost od uvoza i razvije domaću tehnološku bazu. Zajednički trendovi uključuju rast ulaganja u automatizaciju, razvoj umjetne inteligencije i digitalnih platformi. Divergentni pristupi ogledaju se u stepenu državne intervencije, tempu implementacije i strateškoj orijentaciji prema globalnoj konkurentnosti i tehnološkoj suverenosti.

8. Zaključak

Komparativna analiza Kine, Sjedinjenih Američkih Država i Indije pokazala je da se globalna automobilska industrija nalazi u dinamičnoj fazi transformacije pod uticajem automatizacije, robotike i digitalnih tehnologija.

Kina prednjači zahvaljujući strateškim državnim inicijativama i ubrzanoj implementaciji pametne proizvodnje, SAD održavaju konkurentsku prednost kroz inovacije i fleksibilne modele tržišno vođene robotizacije, dok Indija predstavlja rastuće tržište s brzim razvojem proizvodnje, ali ograničenim stepenom automatizacije. Robotika se potvrđuje kao ključni pokretač budućnosti automobilske industrije – omogućava veću produktivnost, bolju kontrolu kvaliteta, fleksibilnost proizvodnih procesa i prelazak na održive tehnologije, uključujući električna vozila. Integracija kolaborativnih robota (cobota), umjetne inteligencije i digitalnih tvornica omogućava ne samo smanjenje troškova i zastoja, već i veću otpornost na globalne poremećaje poput pandemija ili prekida u lancima nabavke.

Sa stanovišta industrijske politike, rezultati ukazuju na potrebu za strateškim ulaganjima u istraživanje, razvoj i obrazovanje kadrova u oblasti robotike i automatizacije. Zemlje koje uspješno povežu državnu podršku, privatne inovacije i međunarodnu saradnju moći će ostvariti održiv industrijski rast i tehnološku

nezavisnost. Za buduća istraživanja preporučuje se dublja analiza međusobne povezanosti robotike, umjetne inteligencije i zelene tranzicije u automobilskoj industriji.

Posebnu pažnju treba usmjeriti na socio-ekonomske efekte visoke automatizacije – uključujući promjene u strukturi zaposlenosti, nove vještine i etičke aspekte integracije čovjeka i tehnologije. U konačnici, robotika ne predstavlja samo tehnološki alat, već i ključnu komponentu održive, pametne i konkurentne industrije budućnosti.

9. Literatura

[1] Karabegović I, Kovačević A, Banjanović-Mehmedović L. et al. *Integration Industry 4.0 in Business and Manufacturing*; IGI Global: Hershey, PA, USA, 2020.

[2] Barari A. & Tsuzuki M. S. G. Smart Manufacturing and Industry 4.0. *Applied Sciences, 13*(3), 1545. https://doi.org/10.3390/app13031545, 2023.

[3] Karabegović I, Karabegović E, Mahmić M, Husak E. The Implementation of Industry 4.0 by Using Industrial and Service Robots in the Production Processes. Chapter 1 in: Karabegović I, Kovačević A, Banjanović - Mehmedović L, Dašić P. (Eds), *Integration Industry 4.0 in Business and Manufacturing,* IGI Global*,* Hershey PA, USA. 1-30. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2725-2.ch001, 2020.

[4] Liu D. & Cao J. Determinants of Collaborative Robots Innovation Adoption in Small and Medium-Sized Enterprises: An Empirical Study in China. *Applied Sciences, 12*(19), 10085. https://doi.org/10.3390/app121910085, 2022.

[5] Xia Q, Zhang B, Zhang X. et al. Investigation on robotic cells design improvement in the welding process of body in white. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 8*(322-333). https://doi.org/10.1007/s41315-023-00317-8, 2024.

[6] Galin R. & Meshcheryakov R, Automation and robotics in the context of Industry 4.0: The shift to collaborative robots. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537(3), 032073. https://doi.org/10.1088/1757899X/537/3/-032073, 2019.

[7] Karabegović I, Majstorović V. (Eds), *Industrija 4.0: Digitalna transformacija oblikuje budućnost (Industry 4.0: Digital Transformation Shaping the Future),* Društvo za robotiku u Bosni i Hercegovini, Bihać, Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Sarajevo, 2024.

[8] Bagheri Rad N. & Behnamian J. Real-time multi-factory scheduling in industry 4.0 with virtual alliances. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 125. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106636, 2023.

[9] Andreoni A, Frattini F. & Prodi G. Getting robots in 'our own hands': Structural drivers, spatial dynamics and multi-scalar industrial policy in China. *Competition &Change*, *0*(0). https://doi.org/10.1177/10245294241261878, 2024.

[10] Chen Y, Dai X, Fu P, Luo G. & Shi P. *A review of China's automotive industry policy: Recent developments and future trends*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 11(5), 867–895. https://doi.org/10.1016/j.jtte.-2024.09.001, 2024.

[11] Papulova Z, Gažova A, Šufliarsky L, Implementation of Automation Technologies of Industry 4.0 in Automotive Manufacturing Companies. *Procedia Computer Science*, 200, 1488-1497. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.350, 2022.

[12] Jadoon G, Ud Din I, Almogren A. & Almajed H. Smart and Agile Manufacturing Framework, A Case Study for Automotive Industry. *Energies, 13*(21), 5766. https:-//doi.org/10.3390/en13215766, 2020.

[13] Tao B, Zhao X. & Ding H. Mobile-robotic machining for large complex components: A review study. *Science China Technological Sciences, 62*, 1388-1400. https://doi.org/10.1007/s11431-019-9510-1, 2019.

[14] Piccarozzi M, Aquilani B. & Gatti C. Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review. *Sustainability, 10*(10), 3821. https://doi.org/-10.3390/su10103821, 2018.

[15] Jagatheesaperumal S, Rahouti M, Ahmad K, Al-Fuqaha A. & Guizani M. The Duo of Artificial Intelligence and Big Data for Industry 4.0: Review of Applications, Techniques, Challenges, and Future Research Directions. *arXiv*. https://doi.org-/10.48550/arXiv.2104.02425, 2021.

[16] Bai C, Dallasega P, Orzes G, Sarkis J, Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective, *International Journal of Production Economics,* Article 107776. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776, 2020.

[17] Soori M, Ghaleh Jough F, Dastres R. & Arezoo B. Intelligent Robotic Systems in Industry 4.0, A Review. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024007, 2024.

[18] Ghobakhloo M, Iranmanesh M, Grybauskas A. & Vilkas M. Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. *Business Strategy and the Environment, 30*(8), 4237-4257. https:-//doi.org/10.1002/bse.2867, 2021.

[19] Naseem M. H. & Yang J. Role of Industry 4.0 in Supply Chains Sustainability: A Systematic Literature Review. *Sustainability, 13*(17), 9544. https://doi.org/-10.3390/su13179544, 2021.

[20] International Federation of Robotics (IFR), Global robot density in factories doubled in seven years (press release / World Robotics Executive Summary) https:-//ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-density-in-factories-doubled-in-seven years?utm_source=chatgpt.com, 2024.

[21] OICA (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers), 2024, Retrieved September 27, from https://www.oica.net/category/production-statistics/-2023-statistics/, 2025.

[22] International Federation of Robotics (IFR), 2025, Presentation of World Robotics 2025 Industrial Robots, https://ifr.org/downloads/press_docs/PressConference-2025_presentation.pdf

[23] International Federation of Robotics (IFR), *World Robotics 2024 – Industrial Robots*. Retrieved from https://ifr.org, 2024.

[24] Karabegović I, A Comparative Analysis of the Role of Industrial and Humanoid Robots as Drivers of Efficiency and Flexibility in the Automotive Industry*, Journal Mobility & Vehicle Mechanics* 51(1): 31- 45. https://doi.org/10.24874/mvm.-2025.51.01.03, 2025.

[25] Karabegović I, Karabegović E, Mahmić M, Husak E. Implementation of Industry 4.0 and Industrial Robots in the Manufacturing Processes. In: Karabegović, I. (eds) New Technologies, Development and Application II. NT 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 76. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_1, 2020.

[26] McKinsey & Company. *The rise of smart manufacturing: Integrating AI and IoT in global production*. *McKinsey Global Institute Reports*. Retrieved from https://-www.eseye.com/resources/blogs/the-rise-of-smart-manufacturing-insights-from-eseyes-state-of-iot-adoption-report/, October 10, 2024.

[27] PwC. *Digital trends in operations survey 2024: Why most companies don't get the results they expect from digital transformation.* PricewaterhouseCoopers International Limited. Retrieved from https://supply-chaindigital.com/operations/-pwc-digital-trends-in-operations-2024, 2024.

[28] PwC. *Global digital trust insights 2024: Creating confidence in an AI-driven world.* PricewaterhouseCoopers International Limited. Retrieved from https://-www.-pwc.com/hu/hu/kiadvanyok/assets/pdf/pwc-2024-global-digital-trust-insights.pdf, 2024.

[29] World Economic Forum. *Shaping the Future of Advanced Manufacturing and Production: Insights from the Global Lighthouse Network. WEF White Paper Series*. https://www.weforum.org/videos/shaping-the-future-of-advanced-manufacturing/, 2024.

[30] OECD. (2024). OECD Digital Economy Outlook 2024 (Volume 1): Embracing the Technology Frontier. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a1689dc5-en, 2024.

[31] NITI Aayog. *National Strategy for Artificial Intelligence – #AIForAll (Revised 2023)*. Government of India. Retrieved from https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2023-03/National-Strategy-for-Artificial-Intelligence.pdf, 2023.

[32] Shah S. Madni, H. H. S, Hashim Z. Bt. M, S. Ali, J. Faheem, M. *Factors influencing the adoption of industrial internet of things for the manufacturing and production small and medium enterprises*. Retrieved October 5, 2025, from: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/cim2.12093, 2024

[33] MIRDATABANK. 2024, *China's automation market trends 2024*. MIRDATABANK News. Retrieved October 6, 2025, from: https://www.mirdatabank.ca-/News/NewsDetail?id=150117, 2024.

[34] Karabegović I, Husak E, Karabegović E, Mahmić M, China istheleadingcountry in theworld in the implementation of robotic technology as the basic technology of Industry 4.0. In: Rackov M, Miltenović A, Banić M. (Eds), *Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering - KOD 2024*. Mechanisms and Machine Science, **174**. Springer, Heidelberg. ISBN978-3-031-80511-0: 612–621. https://-doi.org/10.1007/978-3-031-80512-7_60, 2024.

[35] China Briefing. *Understanding China's AI manufacturing roadmap & implications on FIEs*. Retrieved October 10, 2025, from: https://www.china-briefing.com/news/understanding-chinas-ai-manufacturing-roadmap-implications-on-fies/, 2024.

[36] International Federation of Robotics (IFR), *World Robotics 2018 – Industrial Robots*. Retrieved from https://ifr.org, 2018.

[37] Karabegović I, Karabegović E. The Role of Collaborative Service Robots in the Implementation of Industry 4.0, *International Journal of Robotics and Automation Technology*, Vol.6., pp.40-46.https://doi.org/10.31875/2409-9694.2019.06.5, 2019.

[38] International Federation of Robotics (IFR), *World Robotics 2023 – Industrial Robots*. Retrieved from https://ifr.org, 2023.

[39] Robotics247. *Report: Collaborative robots market poised for new growth cycle*. Retrieved October 10, 2025, from: https://www.robotics247.com/article/report_collaborative_robots_market_poised_for_new_growth_cycle, 2024.

[40] Yao J. F, Yang Y, Wang X. C. et al. Systematic review of digital twin technology and applications. Visual Computing for Industry, *Biomedicine, and Art*, **6**, 10. https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4, 2023.

[41] Karabegović I, The Role of Industry 4.0 in the Modernization of Industrial production in China, *Journal of Scientific and Engineering Research* **4**(9):177-186. http://jsaer.com/download/vol-4-iss-9-2017/JSAER2017-04-09-177-186.pdf,2017.

[42] Malik A. A. & Brem A. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **68**, 102092. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102092, 2021.

[43] Miranda J, Brynjolfsson E, Seamans R, Buffington C. & Goldschlag N. *Adoption of automation technologies by U.S. firms: Evidence from the 2019 Annual Business Survey* (Working Paper No. CES-22-12R). U.S. Census Bureau, Center for Economic Studies (CES), & National Center for Science and Engineering Statistics (NCSES). https://www2.census.gov/ces/wp/2022/CES-WP-22-12R.pdf, 2022.

[44] Stevens, M. *Supporting robotics adoption would boost the U.S. economy.* Information Technology & Innovation Foundation (ITIF). https://itif.org, May 30. 2023.

[45] U.S. Department of Commerce. *CHIPS for America announces new proposed $285 million award for CHIPS Manufacturing USA Institute for Digital Twins,*

Headquartered in North Carolina. https://www.com-merce.gov/news/pressreleases/2024/11/chips-america-announces-new-proposed-285-million-award-chips, November 19 2024.

[46] U.S. Department of Energy. Energy Department Manufacturing Institute selects projects to advance U.S. leadership in smart manufacturing. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-manufacturing-institute-selects-projects-advance-us-leadership-0, July 7, 2020.

[47] Rose J, Lukic V, Knizek C, Milon T, Melecki A. & Choset H. *Advancing robotics to boost U. S. manufacturing competitiveness.* Boston Consulting Group. https://www.bcg.com/publications/2018/advancing-robotics-boost-us-manufacturing-competitiveness, October 25, 2018.

[48] You J, Wu Z, Wei W, Li N. & Yang Y. Evolution of Industrial Robots from the Perspective of the Metaverse: Integration of Virtual and Physical Realities and Human–Robot Collaboration. Applied Sciences, 14(14), 6369. https://doi.org/10.3390/app14146369, 2024.

[49] Karabegović I, Karabegović E, Mahmić M Husak, E, Innovative Automation of Production Processes in the Automotive Industry, *International Journal of Engineering Works* **5**(11): 240-247. https://doi.org/10.5281/zenodo.1486145, 2018.

[50] Puttero S, Verna E, Genta G. & Galetto M. Collaborative robots for quality control: an overview of recent studies and emerging trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*. https://doi.org/10.1007/s10845-025-02600-w, 2025.

[51] Straits Research. India Industry 4.0 market size, share & trends report by 2033. Straits Research. https://straitsresearch.com/report/india-industry-4-0-market, 2023.

[52] Industrial Automation India. *India's Robot Installations Surge 7% in 2024, Automotive Sector Leads IFR Report.* Industrial Automation India. https://www.industrialautomationindia.in/news/india-industrial-robotics-installations-2024-automotive-sector-leads, 2025.

[53] Autocar Professional. *Enabling eco-system needed before India Auto Inc can fully embrace Industry 4.0.* Autocar Professional. https://www.autocarpro.in/news-national/enabling-eco-india-auto-embrace-industry-23879, 2024.

[54] IBEF. *India's rise of the robots: Country among top 10 markets in installations.* India Brand Equity Foundation. https://www.ibef.org/news/india-s-rise-of-the-robots-country-among-top-10-markets-in-installations, June 9. 2025.

[55] Angel One. *India Joins Global Top 10 for Robot Installations: Automotive, Rubber, and Metal Sectors Drive Growth.* Angel One. https://www.angelone.in/news/-market-updates/india-joins-global-top-10-for-robot-installations-automotive-rubber-and-metal-sectors-drive-growth, June 2025.

[56] Autocar Professional. *Enabling eco-system needed before India Auto Inc can fully embrace Industry 4.0.* Autocar Professional. https://www.autocarpro.in/news-national/enabling-eco-india-auto-embrace-industry-23879, 2024.

[57] RIS Policy Brief. India's robot market and Industry 4.0 readiness (Policy Brief No. 103). Research and Information System for Developing Countries. https://www.ris.org.in, May 2021.

ПРОГРЕС У РАЗВОЈУ И ПРИМЕНИ ГОВОРНИХ ТЕХНОЛОГИЈА У ЕРИ ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ

PROGRESS IN THE DEVELOPMENT AND APPLICATIONS OF SPEECH TECHNOLOGIES IN THE AI ERA

ВЛАДО ДЕЛИЋ[1], МИЛАН СЕЧУЈСКИ[2]
СИНИША СУЗИЋ[3], ТИЈАНА НОСЕК[4]
ВУК СТАНОЈЕВ[5]

Прегледни рад
DOI: 10.5937/VI25035D

Резиме: Прогрес у развоју говорних технологија у последњој деценији базиран је на дубоком учењу као парадигми вештачке интелигенције, а и њихова примена представља типичан пример онога што подразумевамо под вештачком интелигенцијом. Развој говорних технологија за неки језик мотивисан је потребом да се том језику да глас у ери вештачке интелигенције, односно, да се на том језику омогући говорна комуникација с машинама. У раду су представљена настојања да се говорне технологије развију за српски и сродне језике. Приказана су достигнућа у том развоју и прве шире примене, као и трендови у светлу промена које вештачка интелигенција доноси у индустрији и образовању.

Кључне речи: препознавање говора, синтеза говора, очување српског језика

Abstract: Progress in speech technology development over the past decade has been based on deep learning, and their application is a typical example of what we understand as artificial intelligence. Developing speech technologies for a language is motivated by the need to provide that language with a voice in the era of artificial intelligence, that is, enable spoken

[1] Владо Делић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, vlado.delic@uns.ac.rs, ORCID број: 0000-0002-4558-9918
[2] Милан Сечујски, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, secujski@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3426-3277
[3] Синиша Сузић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, sinisa.suzic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0511-6729
[4] Тијана Носек, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, tijanadelic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3707-0286
[5] Вук Станојев, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, vukst@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0003-2517-3728

communication with machines in that language. This paper presents efforts to build such technologies for Serbian and related languages, outlining major achievements and initial broad applications. It also discusses emerging trends shaped by the growing influence of artificial intelligence in industry and education.
Key Words: Speech recognition, speech synthesis, preservation of the Serbian language

1. Увод

Све је израженија потреба човека да разговара не само са људима, него и са уређајима у свом окружењу, као што су роботи, апарати у домаћинству и говорни агенти у позивним центрима. Лични говорни асистенти постају системи за диктирање, хватање белешки, преслушавање текстова, па и уређаји за превођење говора, као и помагала за особе са различитим врстама инвалидитета. Посебно је важно да се то свакоме омогући на матерњем језику, што захтева развој говорних технологија за аутоматско препознавање говора и синтезу говора на основу текста за сваки језик засебно.

Овај рад представља достигнућа у развоју говорних технологија за српски и сродне јужнословенске језике у светлу промена које долазе с вештачком интелигенцијом. Рад је организован на следећи начин.

У другом поглављу са нешто више детаља представљене су поменуте говорне технологије, изазови и достигнућа у њиховом развоју за српски језик.

Треће поглавље приказује прве примене у Србији и државама у региону.

У четвртом поглављу сагледани су трендови развоја и примене говорних технологија у светлу промена које вештачка интелигенција доноси на тржишту рада и у систему образовања.

2. Ретроспектива и перспективе развоја говорних технологија за српски

2.1. Актери у контексту вештачке интелигенције

Иницијатори развоја говорних технологија за српски језик на Факултету техничких наука (ФТН) Универзитета у Новом Саду почели су са тим истраживањима пре 30 година (генерација X) када су вештачка интелигенција и говорна комуникација човек-машина били у домену научне фантастике. Носиоци тог развоја данас (генерације Y и Z) користе машинско учење и вештачку интелигенцију као алате, али нису одрасли уз њих као уз интернет и мобилну телефонију са којима су се потпуно сродили. Насупрот њима, данашња деца из α- и β-генерације одрастају окружена вештачком интелигенцијом и за њих је могућност говорне комуникације човек-машина сасвим нормална. Можемо само да маштамо о томе шта њих очекује у контексту убрзане појаве нових технологија.

Вештачка интелигенција, за разлику од претходних технолошких револуција, не само да је много брже наступила него и јасно показује могућности да мења људе – и то не само на тешким, физичким и понављајућим пословима, него и на бројним умним пословима. Уз све то, она долази у време инертних образовних система са споро променљивим курикулумима. Вештачка интелигенција уводи нас у уске калупе са садржајима које бирамо кликовима, нуди нам да чујемо и видимо најпре оно са чиме се већ слажемо, а тако несвесно губимо контакт с реалношћу.

Истраживачи на ФТН су још пре 20 година почели с увођењем предмета из области говорних технологија и машинског учења у поједине студијске програме. Група за акустику и говорне технологије као део јединог акредитованог центра изузетних вредности на ФТН дуже од две деценије има низ националних и европских пројеката. Из те групе је 2003. године поникло и предузеће АлфаНум које се годинама једино у континуитету бавило говорним технологијама за српски и сродне јужнословенске језике на просторима бивше Југославије. Први кораци у развоју говорних технологија за српски ишли су у корак с развојем говорних технологија за велике светске језике, али је разлика у величини тржишта фаворизовала предузећа која су говорне технологије развијала за енглески и друге велике светске језике.

Захваљујући истрајности поменутих истраживача можемо се похвалити вредним резултатима у развоју говорних технологија за српски језик. Нажалост, вишегодишње настојање да се у развој језичких технологија за српски организовано укључи шири круг истраживача и организација уз подршку државе тек у последње време добија изгледе за успех. Да је ова иницијатива препозната од наше државе по узору на бројне државе сличне и мање величине (нпр. Словенија), данас смо могли имати језичке технологије и велике језичке моделе на знатно вишем нивоу, што би директно допринело конкурентности наших компанија и ефикасности институција, као и добробити становника на српском говорном подручју.

Велике светске компаније лансирају све моћније језичке моделе, и то по правилу један општи модел уз наменске моделе за поједине области као што су медицина, правосуђе и др. Користећи огромне количине података и енормне рачунарске ресурсе, они данас развијају и вишејезичне моделе, што омогућава да се модел за мањи језик добије прилагођењем вишејезичног модела коришћењем знатно мање ресурса. Међутим, велики језички модели обучени су на одређеним подацима, а ти подаци су различити за различите државе и језике, те народе са различитом културом, историјом и политиком. Зато је за сваку државу важно да има своје језичке моделе који су наменски развијени за дати језик, макар и прилагођењем вишејезичних модела властитим подацима.

Програм развоја језичких технологија у Србији добио је своје место тек у другој верзији Стратегије развоја у области вештачке интелигенције у Србији 2024-2030, али још није креиран пратећи акциони план. Велике светске компаније из САД и Кине показују интересовање да развијају велике језичке моделе за српски језик, што јесте у складу с наведеним Програмом, али су им за то потребни ресурси попут дигиталног репозиторијума Народне библиотеке Србије, као и говорни и језички ресурси у архиви Јавног медијског сервиса Радио телевизије Србије. Поред самих ресурса потребно је и ангажовање научне и технолошке заједнице за њихову припрему за обуку језичких и говорних модела. Програм зато предвиђа истраживачко-развојне активности на решавању проблема везаних за специфичности српског језика као што су коришћење два писма (ћирилица и латиница), екавски и ијекавски изговор, као и посебне изазове као што је избегавање употребе дијакритичких знакова латиничног писма у одређеним неформалним комуникационим ситуацијама.

Преводиоци текста и преводиоци говора појављују се и као апликације за мобилне телефоне, али и као наменски уређаји који имају микрофонске низове и софтвер за детекцију уста говорника и поништавања буке из других праваца, а имају и гласне спикерфоне, тако да омогућавају коришћење и у прилично бучној средини. Уз то, имају камере и софтвер за оптичко препознавање карактера, могућност приступа интернету кроз мрежу мобилне телефоније итд. Појављују се и компактни таблет уређаји с микрофонским низовима који у реалном времену исписују оно што се говори, раздвајају записе по говорницима, а добијени транскрипт у моменту преводе на други језик и/или формирају сажетак сниманог разговора. Међутим, све ове функционалности су на високом нивоу квалитета доступне само на одређеном броју већих језика и тек предстоје наши напори да све то имамо и на српском и сродним јужнословенским језицима. У наставку ће бити више речи о дометима у развоју говорних технологија за српски језик.

2.2. Домети у развоју синтезе говора на основу текста за српски језик

Упркос убрзаном напретку говорних технологија на светском нивоу у последњој деценији, најквалитетнији постојећи синтетизатор говора за српски језик, као и неке друге сродне језике, и даље је онај развијен у Србији, у сарадњи ФТН и предузећа АлфаНум. Овај синтетизатор свој квалитет дугује систематичном развоју језичких ресурса за ове језике (акценатско-морфолошких речника, те алата за морфолошку анотацију текста и анализу реченичне структуре). Ови ресурси обезбеђују готово непогрешив изговор и интонацију огромног броја речи у свим њиховим појавним облацима (нпр. падежни облици именица). Штавише, иако најсавременији тзв. end-to-end синтетизатори који се обучавају на огромним количинама снимака говора без улажења у

граматичку структуру текста постижу изузетну природност интонације, с времена на време још увек греше у акцентовању појединих речи – што квари утисак при оцењивању и поређењу квалитета синтетизованог говора [1].

Први значајни резултати у развоју синтезе за српски језик овај истраживачки тим постигао је 2002. године увођењем елемената природне интонације [2]. У то време су доминирали тзв. конкатенативни синтетизатори, који су спајали унапред снимљене говорне сегменте уз настојање да ублаже нагле прелазе на спојевима. Уз брижљиво припремљене базе говорних сегмената и усавршаване алгоритме њиховог избора спрам датог текста постизани су значајни резултати у погледу разумљивости, па чак и природности. Међутим, промена гласа или стила говора била је немогућа без снимања нове говорне базе, те су временом преовладали параметарски синтетизатори говора способни да „уче“ из података уместо да их репродукују, и то прво на бази скривених Марковљевих модела (HMM) [3], а потом и помоћу дубоких неуронских мрежа (DNN) [4]. Први синтетизатор за српски језик на бази HMM развијен је од стране истраживача са ФТН [5]. Иако флексибилнији за промене гласа и стила говора, имао је одређена ограничења квалитета синтезе због пробабилистичког приступа, што је био проблем са којим се суочила читава научноистраживачка заједница и који је превазиђен тек појавом синтезе на бази DNN.

Развој синтезе на бази DNN одвијао се у две фазе. У првој фази се још увек користе системи са класичном језичком обрадом текста, док у последње време доминирају end-to-end синтетизатори говора. Наше публикације [6], [7], [8], [9], [1] прате прогрес у развоју синтетизатора говора на основу текста на српском језику у последњој декади. Даљи развој заснивaће се на комбиновању предности које доносе развијени језички ресурси са предностима које доносе решења заснована на дубоком учењу.

Све шира примена синтезе је у двосмерној говорној комуникацији човекмашина у аутоматизованим позивним центрима (енг. voice bots). За утисак двосмерног разговора у реалном времену потребно је да кашњење од добијања текста за синтезу до почетка репродукције првих синтетизованих речи буде испод једне секунде, што постојећи синтетизатор за српски језик већ постиже. За још ширу примену синтезе потребна је варијабилност стила и динамике, као и могућност промене гласа говорника. Пут ка томе отварају велики језички модели, који би брзом анализом текста могли да дају инструкције синтетизатору каквим би гласом и на који начин требало изговорити поједине реченице.

2.3. Домети у развоју препознавања говора за српски језик

Аутоматско препознавање говора има ширу и разноврснију примену од синтезе говора на основу текста, те су решења до којих су дошли светски

гиганти на високом нивоу, укључујући и српски језик. Међутим, ова решења најчешће подразумевају препознавање на серверима којима се приступа преко интернета, што је повезано с низом безбедносних и етичких питања – од неовлашћеног пресретања аудио записа говора на интернету до начина чувања и коришћења снимака јер је глас говорника биометријско обележје. Зато многе институције, као што су медицинске и правосудне, инсистирају на решењу „у кући“ (енг. on premise), а АлфаНум је једина компанија која развија и пласира оваква решења за српски језик, поштујући специфичне потребе ових институција, нпр. специфични вокабулар медицинских налаза.

Дуги низ година основна парадигма за развој система за препознавање говора били су пробабилистички модели – скривени Марковљеви модели (HMM) [10], са развојем DNN поједини делови HMM система били су постепено препуштани неуронским мрежама [11], да би у последњој деценији end-to-end DNN системи са повећањем ресурса за обуку (подаци и процесорски капацитети) надмашили све претходне системе по тачности препознавања говора, па чак и човека [12]. Предности оваквих система долазе до изражаја у отежаним условима препознавања (веома бучна средина, више симултаних говорника), где комбиновањем више модалитета (аудио и видео) може да се формира прецизан транскрипт. Ово је управо један од праваца истраживања на пројекту Multimodal multilingual human-machine speech communication – AI-SPEAK код Фонда за науку Републике Србије, чији је носилац управо истраживачки тим са ФТН, и очекује се да резултати пројекта додатно унапреде обе говорне технологије за српски језик. Поред препознавања говора, у говору је могуће аутоматски препознати и говорника, па и његово тренутно расположење, емоције, али и ставове и намере у дијалошким системима. То су типични примери онога што подразумевамо под вештачком интелигенцијом, тако да и развој и примена говорних технологија представљају угледне примере вештачке интелигенције. Најзначајнији резултати у препознавању говора на српском језику постигнути у сарадњи истраживачког тима са ФТН и предузећа АлфаНум публиковани су у радовима [13], [14] и [15].

3. Примене говорних технологија на српском језику

Неке од примена говорних технологија базирају се само на једној говорној технологији, док њихова комбинација омогућује двосмерну говорну комуникацију човек-машина. Као потенцијално најшире примене могу се издвојити персонални (говорни) асистенти и говорни агенти (енг. *voice bots*), који могу да пруже услуге позивних центара великом броју корисника истовремено јер се значајан део услуга-одговора може у потпуности реализовати аутоматски применом говорних и језичких технологија.

3.1. Примене синтезе говора на основу текста

Прве примене синтезе говора на основу текста на српском језику биле су намењене слепим корисницима рачунара. Они су први прихватили ову говорну технологију још у време конкатенативних сиснтетизатора скромног квалитета, јер су по први пут добили елементе природне интонације у синтетизованом говору на српском језику.

До сада највећи број примена је на веб сајтовима разних институција и медијских кућа – који омогућавају преслушавање текстова са тих веб сајтова помоћу опције „Читај ми“. Примера ради, свака вест приликом постављања на сајт се аутоматски конвертује и у говор, те се поред наслова те вести појављује дугме за покретање, паузирање и прекидање преслушавања.

Примери ове примене синтезе говора су на веб сајтовима влада (Србије и Црне Горе), већег броја јавних институција (скупштине, градови), јавних медијских сервиса и приватних новинских агенција у Србији, Црној Гори, као и Босни и Херцеговини, па и у Хрватској. Поред тога, почеле су и примене у разгласу у јавном превозу, нпр. на станицама брзе пруге у Србији, неких аеродрома у региону, као и такси удружења. Поред тога, произведен је већи број аудиоиздања књига и часописа, прво за потребе савеза слепих, касније и за шири круг корисника, укључујући студенте – пример је Централна аудиобиблиотека Универзитета у Новом Саду [16].

У неким ситуацијама корисно је да синтетизовани говор буде праћен приказом анимираног лица (аватара) који покретима усана и изразима лица прати оно што изговара. То омогућава боље разумевање, па чак и у бучној средини. Анимирање лица аватара није толико језички зависно као синтеза говора, већ је облик и израз лица више је повезан са акустичким својствима онога што се тренутно изговара, независно од језика. Лик аватара може одговарати говорнику (нпр. особи која држи предавање), али и некој историјској личности коју је на овај начин могуће „оживети“.

Јасно је, међутим, да клонирање нечијег гласа, а поготово синхронизованих покрета усана и израза лица, може бити и предмет злоупотребе (енг. deepfake). Клониране гласове, па и видео-снимке говора, све је теже разликовати од природних, а при томе је вештачка интелигенција успешнија у откривању вештачки генерисаног садржаја од човека.

Једино решење за спречавање злоупотреба ових технологија је у доношењу одговарајућих прописа који би предвиђали обавезу да сваки дигитални садржај (аудио и видео) садржи „потпис“ аутора у виду тзв. воденог жига (енг. watermark) који не нарушава аудио/видео садржај, али омогућује да се лако утврди да ли иза садржаја заиста стоји особа наведена као аутор.

3.2. Примене препознавања говора

С развојем аутоматског препознавања говора ширио се и опсег примене. До пре десетак година доминирале су примене ограниченог обима речника и то углавном на великим светским језицима. Већ то је омогућавало издавање говорних команди у концепту паметне куће или навигацију кроз једноставнији дијалошки систем. Померање парадигме развоја говорних технологија с HMM на DNN концепт знатно је повећало тачност и робусност препознавања говора, а велики језички модели повећали су применљивост дијалошких система.

АлфаНум је у сарадњи са ФТН развијао сопствена решења за аутоматско препознавање говора. Овај развој је последњих десетак година фокусиран на области као што су медицина и правосуђе. Да би се омогућило диктирање медицинских налаза било је неопходно омогућити правилну интерпретацију разних медицинских термина, скраћеница и мерних јединица, а језички модел развијен за српски језик морао је бити проширен латинским изразима. С друге стране, вокабулар и говорни стил потпуно су другачији у правосуђу, где, примера ради, судски списи садрже мноштво властитих имена, назива предузећа, улица, те географских појмова. Уз интензивну сарадњу с партнерима из области медицине и правосуђа, како у погледу обуке језичких модела, тако и функционалности које су потребне корисницима у овим доменима, настали су производи „Медикта“ и „Јурисдикта“. Ови системи записују диктат у реалном времену са изузетно високом тачношћу, при чему се препознавање обавља на серверу који се физички налази у оквиру саме институције, а уз то могу да се интегришу у софтвер који се у институцији већ користи.

Прилагођавањем отворених модела као што је препознавач говора Whisper компаније *OpenAI* [17] или Parakeet модел компаније NVIDIA [18], исти истраживачки тим развио је и препознавач говора опште намене под називом „Транскрипта“, који може да се користи за транскипцију говора снимљеног са нпр. састанка или предавања. Добијени транскрипт синхронизован је с аудио снимком, што омогућава брзу корекцију уочених штампарских грешака, а постоји и могућност дијаризације, тј. раздвајања транскрипта по говорницима.

Илустрације ради, препознавач говора Whisper био је обучен са 680.000 сати снимљеног говора и пратећег транскрипта (у верзији 3 и преко 1.000.000 сати) – већином на енглеском, доста на великим светским језицима, а веома мало на српском (око 20-так сати). Колико су то огромни ресурси за обуку најбоље говори чињеница да је АлфаНум успео да припреми за обуку мање од 2.000 сати говора с прецизним транскриптом – што је много више у односу на остале постојеће базе за српски језик. Пре прилагођавања за српски језик Whisper (medium) имао је стопу грешке од 30% на нивоу речи, али се прилагођавањем на основу расположивих ресурса АлфаНума грешка може спустити

на 5%. Међутим, Whisper није предвиђен за препознавање у реалном времену него за транскрипцију већ снимљеног говора, што онемогућава примене у позивним центрима и voice bot апликацијама, које захтевају мало кашњење.

Напредни персонални говорни асистенти би, поред синтезе говора на основу текста и аутоматског препознавања говора (шта је речено), требало да препознају и говорника (ко је рекао), па и његово расположење, намере и ставове. Дакле, такви говорни асистенти треба да обухвате све поменуте говорне технологије и вештачку интелигенцију у пуној мери.

3.3. Примене говорних као асистивних технологија

Говорне технологије могу да помогну великом броју особа са различитим врстама инвалидитета. Слепе особе могу без помагала да читају само текст на Брајевом (рељефном) писму помоћу чула додира, те не могу да користе рачунар или сличан уређај без синтетизетора говора. Слепи у Србији користе АлфаНум синтезу (верзија 4), под називом „anReader“, углавном за слушање обимнијег текста, док за навигацију кроз менију на рачунару чешће користе скромнији синтетизатор због бржег одзива. Очекују се пројекти који ће омогућити да се квалитетнија синтеза (верзија 5 или 6) пружи слепим корисницима рачунара. Важна улога синтетизатора говора је и у продукцији аудиокњига, што је много практичније од ангажмана професионалних спикера, али захтева синтезу изузетно високог квалитета, ону која би у идеалном случају свој говор прилагодила контексту у мери у којој је то у стању и професионални спикер.

Одређено унапређење квалитета експресивне синтезе говора може се постићи уз помоћ инструкција како би нешто требало изговорити које може пружити одговарајући велики језички модел, па је могуће и читање гласовима више говорника у случају потребе. Неопходни су и TTS модели тренирани на већим количинама експресивних података. Треба напоменути да су аудиоиздања корисна не само слепима већ и свима онима који не могу лако да листају књиге, као што су особе са церебралном парализом, дистрофијом и квадриплегијом, а слично се односи и на особе са дислексијом.

Синтетизатори говора веома су корисни особама с потешкоћама у говору, без обзира да ли се ради о немим особама, особама које су подвргнуте ларингектомији или су привремено изгубиле моћ говора. Сви они могу на телефону да напишу шта желе да кажу и телефон ће помоћу синтетизатора претворити дати текст у гласан и јасан говор. У случају особа подвргнутих ларингектомији чак је могуће реализовати и синтезу говора гласом исте особе снимљеним пре ларингектомије.

С друге стране, аутоматско препознавање говорних команди може да послужи особама с физичким инвалидитетом да говорним командама управ-

љају уређајима у окружењу (нпр. паметној кући), као и особама са било којим другим типом инвалидитета, под условом да могу разговетно да издају те команде. Препознавање говора од користи је и особама које не чују говор јер им ставља на располагање транскрибовани текст. Најзад, како би се у потпуности схватиле могућности говорних технологија за помоћ особама с инвалидитетом, треба приметити да оне омогућују комуникацију помоћу говора и/или текста између потпуно глуве, слепе и неме особе.

4. Трендови развоја и примене говорних технологија

Тренд нестанка малих језика, који је свакако присутан, могао би се интензивирати у ери вештачке интелигенције за језике за које се не буду пратили трендови развоја и примене говорних и језичких технологија, јер ће се млади нараштаји ослањати на језике на којима су им расположиве нове технологије, те корисне и забавне апликације. С друге стране, вишејезични модели и релативно лак развој говорних и језичких технологија за сваки наредни језик омогућује да се ове технологије развију и за језике са малим бројем говорника. Пример језика за који су развијене говорне технологије, које доприносе и његовом очувању, јесте језик Лужичких Срба, који данас говори свега око 60.000 говорника у Немачкој [19]. Чињеница да данас деца (α- и β-генерација) одрастају у окружењу у ком је нормално да машине причају као људи и разумеју не само шта човек говори, него и ко и како говори, омогућиће брже и лакше прихватање свих нових апликација и сервиса базираних на говорној комуникацији човек-машина. Свако ће у џепу имати приватног туристичког водича, преводиоца, дактилографа, спикера, па и некога с ким може увек попричати, а ко ће свог власника добро познавати, препознавати нијансе у његовом гласу, расположење и намере, служити као извор свих жељених информација, подсетник, забављач, заштитник од превара и саветник у пословним одлукама. Свака нова технологија може бити и злоупотребљена, па се томе мора посветити посебна пажња. Један правац је глобална сарадња на изради законских решења и сузбијању злоупотреба, али ћемо на крају морати сами да критички преиспитамо све што може да буде лажно, и то вероватно уз помоћ персоналних асистената. На крају ће најуспешнији бити они који највештије буду користили добробити које нам вештачка интелигенција доноси, и зато је важно дати глас сваком језику у ери у коју смо већ ушли, и за коју нам досадашње искуство говори да ће бити пуна динамичних промена.

5. Закључци

Говорне и језичке технологије које се ослањају на велике језичке моделе, развијене за одређени језик, повећавају продуктивност и конкурентност при-

вредних субјеката, унапређују ефикасност јавне управе и олакшавају коришћење дигиталних технологија на датом говорном подручју.

У раду су представљени домети у развоју говорних технологија за српски и сродне језике, перспективе даљег развоја и примене у ери вештачке интелигенције. Представљене су прве примене ових технологија у Србији и региону, како синтезе говора на основу текста тако и препознавања говора, са посебним осврtом на примену говорних технологија као асистивних.

Иако развој вештачке интелигенције може да продуби јаз између великих и малих држава и нација, те да се у ери дигитализације мали језици изгубе, прилагођење великих језичких модела у циљу развоја говорних технологија за мале језике може и да допринесе њиховом очувању. На тај начин сваки језик може да добије глас у ери вештачке интелигенције у коју улазимо кроз 4. и 5. индустријску револуцију, а одговарајући напори морају се уложити и у развој законских решења неопходних за сузбијање злоупотреба ових технологија.

6. Захвалница

Истраживање спроведено уз подршку Фонда за науку Републике Србије, #7449, *Multimodal multilingual human-machine speech communication* – AI-SPEAK

7. Литература

[1] T. Nosek et al, End-to-End Speech Synthesis for the Serbian Language Based on Tacotron. *Proc. SPECOM 2024*, Belgrade, Serbia, pp. 219-229, 2024.

[2] M. Sečujski et al, AlfaNum System for Speech Synthesis in Serbian Language. *Proc. of TSD'02*, Brno, Czech Republic, pp. 237-244, 2002.

[3] T. Yoshimura et al. Simultaneous modeling of spectrum, pitch and duration in HMM-based speech synthesis. *Proc. of EUROSPEECH*, Vol. 5, pp. 2347–2350, 1999.

[4] H. Zen, A. Senior, M. Schuster, Statistical parametric speech synthesis using deep neural networks. *Proc. ICASSP 2013*, pp. 7962–7966, 2013.

[5] Е. Пакоци, Синтеза говора на бази скривених Марковљевих модела за српски језик, *Дипломски мастер рад*, Факултет техничких наука, 2012.

[6] T. Delić, M. Sečujski, S. Suzić, A review of Serbian parametric speech synthesis based on deep neural networks. *Telfor Journal*, Vol. 1, No. 9. pp. 32–37, 2017.

[7] M. Sečujski et al, Speaker/style-dependent neural network speech synthesis based on speaker/style embedding. *JUCS*, Vol. 4, No. 26, pp. 434–453, 2020.

[8] S. Suzić et al, HiFi-GAN based text-to-speech synthesis in Serbian. *Proc. 30th EUSIPCO*, Belgrade, Serbia, pp. 2231–2235, 2022.

[9] S. Suzić et al, Style transplantation in neural network based speech synthesis. *Acta Polytech. Hung.*, Vol. 6, No. 16, pp. 171–189, 2019.

[10] L. R. Bahl et al, Speech recognition with continuous-parameter hidden Markov models. *Computer Speech & Language*, Vol. 2, Issues 3–4, pp. 219-234, 1987.

[11] G. Hinton et al, Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: the shared views of four research groups. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 29, No. 6, pp. 82-97, 2012.

[12] H. Ahlawat, N. Aggarwal, D. Gupta, Automatic speech recognition: a survey of deep learning techniques and approaches. *IJCCE*, Vol. 6, pp. 201-237, 2025.

[13] B. Popović et al, Voice assistant application for the Serbian language. *Proc. 23rd TELFOR*, Belgrade, Serbia, pp. 858–861, 2015.

[14] B. Popović, E. Pakoci, D. Pekar, Transfer learning for domain and environment adaptation in Serbian ASR. *Telfor Journal*, Vol. 2, No. 12, pp. 110–115, 2020.

[15] E. Pakoci et al, Overcoming data sparsity in automatic transcription of dictated medical findings. *Proc. 30th EUSIPCO*, pp. 454–458, 2022.

[16] V. Delić et al, Central audio-library of the University of Novi Sad. *Proc. of Intelligent Distributed Computing XIII*, pp. 467–476, 2020.

[17] A. Radford et al, Robust speech recognition via large-scale weak supervision. *Proc. of the International Conference on Machine Learning*, pp. 28492-28518, 2023.

[18] O. Kuchaiev et al, Nemo: a toolkit for building ai applications using neural modules, *arXiv*:1909.09577, 2019.

[19] I. Kraljevski et al, Preserving Language Heritage Through Speech Technology: The Case of Upper Sorbian. *Proc. SPECOM 2024*, Belgrade, Serbia, pp. 3-22, 2024.

РАЗВОЈ И УНАПРЕЂЕЊЕ НАСТАВНИХ ПРОЦЕСА УПОТРЕБОМ АЛАТА/ПЛАТФОРМИ ЗАСНОВАНИХ НА ВЕШТАЧКОЈ ИНТЕЛИГЕНЦИЈИ

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF TEACHING PROCESSES USING TOOLS/PLATFORMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

СТЕВАН СТАНКОВСКИ[1]
ГОРДАНА ОСТОЈИЋ[2]

Прегледни рад
DOI: 10.5937/VI25047S

Резиме: Један од разлога зашто значајан број студената не похађа редовно наставу у учионицама је зато што у наставним процесима нису довољно интегрисани садржаји који користе алате/платформе засноване на вештачкој интелигенцији (ВИ). Ови алати могу значајно да увећају пажњу студената и да помогну да се постојећи наставни процеси унапреде и лакше савладају. У циљу да се негативни ефекти овог тренда зауставе/елиминишу, осим комерцијалних алата/платформи, развијени су и посебни наставни садржаји засновани на пажљивом изабраном наставном материјалу уз употребу алата ВИ, који користе проверено знање насупрот генеративним алатима ВИ, који се засновани не само на одобреног и провереног знања, већ и на све доступном објављеном знању.

Кључне речи: образовање, знање, вештачка интелигенција

Abstract: One of the reasons why a significant number of students do not attend regular classes in classrooms is that the teaching processes do not sufficiently integrate content that uses tools/platforms based on artificial intelligence (AI). These tools can significantly increase student attention and help improve existing teaching processes, making them easier to master. In order to stop/eliminate the negative effects of this trend, in addition to commercial tools/platforms, special teaching contents have been developed based on carefully selected teaching materials using AI tools, which use proven knowledge, as opposed to generative AI tools, which are based not only on approved and verified knowledge, but also on widely available published knowledge.

Key Words: Education, Knowledge, Artificial Intelligence.

[1] Стеван Станковски, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, stevan@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4311-1507
[2] Гордана Остојић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, goca@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-5558-677X

1. Увод

Технологије засноване на вештачкој интелигенцији (ВИ) свакодневно мењају начине на које високошколске установе припремају и одржавају наставне процесе, процењују и вреднују знање студента. Постоји већи број платформи који користе технологије ВИ које омогућавају да се направе персонализовани садржаји за студенте и да се у складу са тим изврши и вредновање овладаног знања. Овакав начин прилагођавања садржаја наставног процеса омогућавају „персонализоване/индивидуализоване путеве учења“ који прилагођавају садржаје користећи показатеље као што су нивои знања, понашање и преференције студената [1].

Користећи алгоритме ВИ са адаптивном логиком, платформе у складу са прилазом Adaptive Learning 3.0 омогућавају прилагођавање наставих процеса у реалном времену у циљу оптимизације процеса учења [2]. На овај начин се могу унапредити процеси овладавања знањем као и мотивација за учење, приближно 59 %, док се ангажовање студента повећало за 36% [1]. Свакако да омогућавање персонализованог учења има и низ изазова (технолошке, педагошке, инфраструктурне, …) што усложњава имплементацију и прихватање [1].

Технологије ВИ омогућавају и детаљну анализу података о учењу студената, што наставницима пружа увид у индивидуалне обрасце напредовања, као и идентификацију области у којима су потребне додатне интервенције. Овакви подаци могу се користити за правовремено препознавање студената који показују ризик од слабијег успеха или прекида студија, што омогућава планирање циљаних мера подршке.

Платформе засноване на ВИ такође подржавају аутоматизовано генерисање квизова, евалуација и повратних информација, чиме се наставницима омогућава да више времена посвете педагошком раду, а мање административним задацима [3-6].

Успешна интеграција ВИ у високо образовање захтева прецизно дефинисане педагошке моделе, етичке оквире и јасна упутства за коришћење података о студентима. Питања приватности, транспарентности алгоритама и могућих пристрасности морају се решавати системски, у складу са позитивних законским актима, како би се обезбедило правично и поуздано окружење за учење.

Осим тога, инфраструктурни захтеви, као и потреба за обуком наставног кадра, представљају значајан фактор који утиче на брзину и квалитет имплементације. Упркос овим изазовима, трендови показују да ће ВИ у наредним годинама постати темељ модерних образовних система, јер нуди могућности које далеко превазилазе оквире традиционалних дидактичких приступа [7-10].

2. Прихватање ВИ у наставним процесима

Постоји низ фактора који утичу (са различитим тежинским фактором-утицајем) на прихватање алата/платформи заснованих ВИ у наставним процесима. Сигурно је да је један од најважнијих фактора који је перципиран корисност од употребе алата/платформи заснованих ВИ у наставним процесима, односно веровање корисника да коришћени алати/платформи побољшавају процес учење и да су једноставни за употребу [1]. Међу највише испитиваним алатима/платформама је коришћење ChatGPT-а, где је перципирана једноставност употребе и корисност, али исто тако и ограничења која су присутна. Слична запажања су и код примене виртуелних асистената, који се усвајају када студенти виде да су корисни, једноставни и да им верују [1], [11-12].

Повезано са прихватањем алата/платформи заснованих ВИ је и поверење у њихову тачност и поузданост. Јасно је да је критичан моменат у развоју алата/платформи заснованих ВИ, обука модела и питања везана за безбедност података и њихову приватност. Такође приватност мора бити загарантована и у случају њиховог коришћења, јер корисници не желе да брину о сигурности и приватности података при интеракцији са овим алатима/платформама. Поред тога, мора се обезбедити и усклађеност са наставним процесом, навикама и досадашњим коришћеним педагошким методама, иначе због ових неусклађености, могу настати баријере (одбојност) у њиховом прихватању [12-14].

Институционална подршка је такође важан фактор за прихватање технологија заснованих на ВИ. Погрешни су прилази који забрањују њену употребу, напротив високошколске установе (а не само оне него и све образовне институције на претходним нивоима) треба да искористе расположиву технологију за унапређене наставних процеса, као и средство помоћу којих већи број студената може имати могућност да овлада предвиђеним знањем. Јасна подршка институције, добра обука наставног кадра, охрабривање и подстицање за примену технологија заснованих на ВИ, олакшавају њено усвајање и смањују ризик од [4, 14-16].

И пред предавачима је велики изазов који од алата/платформи да изаберу и ставе у наставни процес. У наредном поглављу ће бити приказан преглед алата за обуку неуронских мрежа, као једној од основних техника ВИ која се користи у различитим областима.

Институционална подршка и политике – Наставници су више расположени да користе ВИ алате када осећају да их институција подржава и охрабрује њихову употребу [4]. Јасне политике, обука и подстицаји могу смањити перципирани ризик и олакшати усвајање.

3. Алати за рад са неуронским мрежама

Неуронске мреже (Neural Network NN) су једна од најважнија техника које се користе у апликацијама које се сматрају да су засноване на ВИ. Управо због веома широког спектра где се неуронске мреже могу применити, извршена је анализа доступних алата. У табели 1 дато је поређење доступних алата које могу да се користе за рада са NN, са основним карактеристикама [17-24].

Из табеле 1, се може видети да понуђени алати могу да се искористе за решавање различитих задатака у индустријским и неиндустријским применама. Такође, поједини алати су погодни за почетнике, који не морају да поседују знање из програмирања, док је код других алата то основни предуслов. Овако широк спектар понуђених алата, пружа могућност извођачима наставног процеса да изаберу алат који је највише прилагођен претходно стеченом знању и искуству корисника.

Табела 1. Преглед алата за рад са неуронским мрежама

Алат	Најбоља примена	Предности	Мане	Цена
Tensor Flow	Имплементација у индустрији (слике, NLP, аудио, предиктивна анализа)	Велика и активна заједница; Подржава Keras; Претходно обучени модели; Добро ради са сликама, текстом и аудио; Веома скалабилан; Подржан од Google-a	Захтева много ресурса; Сложен за почетнике; Ограничена подршка на Windows OS	Бесплатан
Py-Torch	Истраживање и брзо експериментисање; развој нових архитектура	Једноставније дебаговање; Јак екосистем (Hugging Face Transformers); Добра документација	Захтева много ресурса	Бесплатан
JAX	Дубоко учење великих размера; GPU/TPU оптимизација	Лако дебаговање; Интуитиван интерфејс; Изузетно брз	Мање туторијала и алата	Бесплатан
Caffe	Класификација слика; компјутерски вид	Брза и ефикасна обрада слика; Интеграција са Python-ом и MATLAB-ом; Висока модуларност	Тешкоћа рада са конфигурационим датотекама; Сложен за почетнике	Бесплатан

Алат	Најбоља примена	Предности	Мане	Цена
Microsoft Cognitive Toolkit	Комерцијалне апликације; дистрибуирано дубоко учење	Мерење перформанси; Подржава DNN, CNN, RNN; Ради на Linux и Windows	Мања заједница; Није у активном развоју; Тешка преносивост модела	Бесплатан
Keras	Брза израда прототипова; једноставни модели	Једноставан за коришћење; Добар за почетнике; Опширна документација; Интеграција са TensorFlow и JAX	Ограничене могућности прилагођавања; Мање ефикасан за велике моделе; Почетно подешавање на Windows-у изазовно	Бесплатан
Scikit Learn	Традиционални ML задаци (регресија, класификација, кластеризација)	Једноставан API; Добра документација; Ефикасан за мање скупове података	Није дизајниран за дубоко учење; Недостатак подршке за сложене NN архитектуре	Бесплатан
Google Colab	Едукација, тимски рад, брзо учење; cloud окружење	Брзо кодирање; Погодан за почетнике; Интерактивни материјали; Бесплатан приступ GPU-у; Рад у тимовима	Ограничен приступ снажном хардверу без претплате; Сесија траје до 12h; GPU/TPU ресурси нису гарантовани	Бесплатан (постоји и плаћена верзија)

Који од наведених алата ће бити изабран да се користи у наставном процесу, зависи од многих фактора. Многе институције захтевају униформност, немају могућност да плаћају лиценцу, не желе да се вежу само за једног добављача, као и други низ ограничења/захтева који се типично појављују када се наставна средства уводе у наставни процесе.

Који од наведених алата ће бити изабран да се користи у наставном процесу, зависи од многих фактора. Многе институције захтевају униформност, немају могућност да плаћају лиценцу, не желе да се вежу само за једног добављача, као и други низ ограничења/захтева који се типично појављују када се наставна средства уводе у наставни процесе. Поред финансијских ограничења, значајну улогу има и доступност техничке инфраструктуре, јер обука

неуронских мрежа захтева снажне графичке процесоре (GPU) или облачне ресурсе. Алати као што су TensorFlow и PyTorch, због своје флексибилности и подршке великих заједница, често су први избор у настави, посебно у оквирима виших нивоа студија где је потребно објашњавати архитектуре дубоког учења.

Једноставнији алати, попут Keras-а или Scikit-Learn-а, користе се када је циљ да студенти стекну основна знања о машинском учењу пре него што пређу на комплексне моделе. Додатно, платформа Google Colab се често бира јер омогућава бесплатно коришћење GPU ресурса, чиме се значајно смањује притисак на инфраструктуру установе. Међутим, одређене институције преферирају локалне алате или self-hosted решења из разлога безбедности података и контроле приступа.

При избору оквира за обуку неуронских мрежа, наставници морају узети у обзир и ниво предзнања студената, сложеност курикулума, као и потребу за праксама које одражавају индустријске стандарде. На пример, PyTorch се сматра прикладнијим за истраживачке програме, док је TensorFlow чешћи избор у примењеним инжењерским дисциплинама. Поред тога, интеграција алата са постојећим ЛМС (Learning Management System) системима, подршка за визуелизацију током тренинга (TensorBoard), као и стабилност библиотека током памћења верзија, такође играју значајну улогу. На крају, успешан избор оквира подразумева равнотежу између дидактичких захтева, доступне инфраструктуре и дугорочних стратегија развоја институције.

4. Закључак

Технологије засноване на ВИ имају потенцијал да трансформишу високо образовање у правцу персонализованог учења, значајно олакшају процесе извођења наставе и у уједно олакшају овладавање знањем од стране студената. Алати/платформе засноване на ВИ, представљају поуздану основу у циљу развоја персонализованог учења. Прихватање самог концепта персонализованог учења, као алата/платформи, међутим, није загарантовано. Истраживања показују да су карактеристике попут једноставности употребе, корисност, поверења, квалитета повратних информација, социјални утицај, заправо кључни фактори који утичу на усвајање концепта и нових технологија. Високошколске образовне институције треба да дају приоритет пројектима усмереним на студенте, пруже обуку и подршку, обезбеде безбедност података и ускладе алате/платформе зановане на ВИ са постојећим педагошким праксама. Посматрањем и индивидуалних и системских фактора, високо образовање може промовисати успешну интеграцију ВИ и остварити њен потенцијал за побољшање исхода учења.

Избор алата/платформи који ће се користити у наставном процесу је такође сложен задатак. Постоји низ фактора који опредељују једну институцију који алат/платформу ће изабрати, али једна од препорука је да се и поред тога што се користи само једна платформа, студенти упознају и са могућностима и других алата/платформи.

4. Изјаве захвалности

Истраживања у овом раду су финансирана са пројекта под називом „Унапређење квалитета наставе на судијским програмима Департмана кроз имплементацију резултата научно-истраживачког рада у области Индустријског инжењерства и менаџмента“.

У припреми овог рада су коришћени ChatGPT, Gemini и Copilot.

5. Литература

[1] du Plooy E, Casteleijn D. & Franzsen D, Personalized adaptive learning in higher education: A scoping review of key characteristics and impact on academic performance and engagement. *Heliyon,* 10(21), e39630, 2024.

[2] https://www.fulcrumlabs.ai/adaptive-learning-3-0/, accessed 20.11.2025.

[3] Holmes W, Bialik M, Fadel C, *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*, Center for Curriculum Redesign, 2019.

[4] Conati C, Porayska-Pomsta K, Mavrikis M, AI in Education - Where Are We Now? *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 31(4), pp. 877–904, 2021,

[5] Woolf B. P. *Building Intelligent Interactive Tutors: Student - Centered Strategies for Revolutionizing E-Learning*. Morgan Kaufmann, 2010.

[6] Wang Y, Vogel D. & Kumar M. Adaptive Learning 3.0: AI-Driven Personalization in Higher Education, *Computers & Education*, 190, 2023.

[7] Ifenthaler D. & Yau J. Y. K, Utilizing Learning Analytics for Study Success: Reflections on Current Empirical Findings, *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*, 15(1), 2020.

[8] Fadlelmula F. K. & Qadhi S. M. A systematic review of research on artificial intelligence in higher education: Practice, gaps, and future directions in the GCC, *Journal of University Teaching and Learning Practice*, 21(6), 146-173, 2024

[9] Romero C, Ventura S, Educational Data Mining: A Review of the State of the Art. IEEE Transactions on Systems, *Man and Cybernetics*, pp 601-618, 2010.

[10] Luckin R, Holmes W, *Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education, Pearson*, London, 2016.

[11] Sajja R, Sermet Y, Cikmaz M, Cwiertny D, Demir I, Artificial Intelligence-Enabled Intelligent Assistant for Personalized and Adaptive Learning in Higher Education, *Information*, 2024, 15, 596. 2024.

[12] Stankovski S, EIM'S MESSAGE: Be Ready to Incorporate AI Principles into Education, *Journal of Mechatronics Automation and Identification Technology*, vol. 10, no. 2. pp. E1-E2, 2025.

[13] Raman R, Mandal S, Das P, Kaur T, JP, S, Nedungadi P, University students as early adopters of ChatGPT: Innovation Diffusion Study, DOI: https://-doi.org/-10.21203/rs.3.rs-2734142/v1, 2023.

[14] Abulail R. N, Badran O. N, Shkoukani M. A. & Omeish F, Exploring the factors influencing AI adoption intentions in higher education: An integrated model of DOI, TOE, and TAM, *Computers*, 14(6), 230, 2024.

[15] Tran M. D, Nguyen K. H, Nguyen H. T, Dinh T. H. N, Leng H. H. V, Tran T. T, ... & Nguyen D. N, AI as my teacher: adoption of AI-driven virtual teaching assistants among students using the unified theory of acceptance and use of technology 2, Higher Education, *Skills and Work-Based Learning*, 15(6), 1302-1322., 2025.

[16] https://www.newyorker.com/culture/the-weekend-essay/will-the-humanities-survive-artificial-intelligence, accessed 20.11.2025.

[17] https://www.tensorflow.org, accessed 20.11.2025

[18] https://www.pytorch.org, accessed 20.11.2025

[19] https://www.jax.readthedocs.io, accessed 20.11.2025

[20] https://www.caffe.berkeleyvision.org, accessed 20.11.2025

[21] https://www.github.com/microsoft/CNTK, accessed 20.11.2025

[22] https://www.keras.io, accessed 20.11.2025

[23] https://www.scikit-learn.org, accessed 20.11.2025

[24] https://www.colab.research.google.com, accessed 20.11.2025

АНАЛИЗА И АУТОМАТСКА ДЕТЕКЦИЈА ДЕФЕКАТА НА ЛИВЕНИМ ДЕЛОВИМА ПРИМЕНОМ ДУБОКОГ УЧЕЊА

ANALYSIS AND AUTOMATIC DEFECT DETECTION ON CAST PARTS USING DEEP LEARNING

ВАСО МАНОЈЛОВИЋ[1], МИРОСЛАВ СОКИЋ[2]
ГОРДАНА МАРКОВИЋ[3], ГВОЗДЕН ЈОВАНОВИЋ[4]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VI25055M

Резиме: Детекција дефеката код ливених делова представља један од основних корака у осигурању квалитета индустријских производа. Традиционалне методе контроле често су споре, субјективне и захтевају значајно искуство оператера, што отвара простор за примену савремених техника машинског учења. У овом раду приказана је примена конволуционих неуронских мрежа за идентификацију дефеката на ливеним деловима потопних пумпи, користећи скуп података отвореног приступа. Анализирани су кораци обуке и тестирања модела, као и начини интерпретације резултата који омогућавају његову употребу у реалним индустријским условима. Добијени резултати указују на високу тачност модела и потенцијал дубоког учења као поузданог алата за аутоматизацију контроле квалитета у ливарској индустрији.

Кључне речи: ливени делови, дефекти, машинско учење, дубоко учење, контрола квалитета, аутоматска инспекција

Abstract: Defect detection in cast components is one of the fundamental steps in ensuring the quality and reliability of industrial products. Traditional inspection methods are often

[1] Васо Манојловић, Универзитет у Београду, Технолошко металуршки факултет, Карнеџијева 4, Београд, v.manojlovic@tmf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3009-2909

[2] Мирослав Сокић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франш д'Епереа 86, Београд, m.sokic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4468-9503

[3] Гордана Марковић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франш д'Епереа 86, Београд, g.markovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0003-1169-2084

[4] Гвозден Јовановић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франш д'Епереа 86, Београд, g.jovanovic@itnms.ac.rs, ORCID: 0000-0002-9754-2230

slow, subjective, and dependent on the operator's experience, which creates space for the application of modern machine learning techniques. This paper presents the use of convolutional neural networks for identifying defects in cast components of submersible pumps, based on an open-access image dataset. The key stages of model training, testing, and result interpretation are analyzed, with emphasis on their applicability in real industrial environments. The obtained results demonstrate high classification accuracy and confirm the potential of deep learning as a reliable tool for automating quality inspection in the casting industry.
Key Words: cast components; defects; machine learning; deep learning; quality control; automated inspection.

1. Увод

Контрола квалитета ливених делова представља један од најважнијих сегмената савремене индустријске производње, јер дефекти који настају током процеса ливења могу довести до повећаних трошкова производње или смањене поузданости производа услед деградације механичких својстава. Традиционалне методе инспекције, које се ослањају на визуелну контролу или класичне технике испитивања без разарања, често су временски захтевне и у великој мери зависе од субјективне процене инспектора. Са развојем дигиталних технологија и доступношћу великих скупова података (нпр. слике дефеката), примене дубоког учења, а нарочито конволуционих неуронских мрежа (CNN), постале су један од најистраженијих приступа у аутоматизацији инспекције ливених производа [1-3]. Ипак, детекција дефеката на ливеним производима и даље представља изазов због велике варијабилности облика, сложених текстура, присуства шумова у сликама и ограничене доступности висококвалитетних података. Значајан број радова указује на проблеме као што су пренаглашена зависност модела од специфичних карактеристика датог скупа података, неправилна сегментација објеката, или лажни сигнали сигнала који не припадају објекту анализе.

На пример, Jung и сарадници (2023) користе екстракцију кандидата за аномалије на сликама високе резолуције како би се прецизније изоловала проблематична подручја [4]. Du и сарадници (2019) и Jiang и сарадници (2021) примењују напредне CNN архитектуре и технике пажње (attention mechanisms) како би повећали осетљивост модела на стварне дефекте, а умањили осетљивост на шум и квалитет слике [5, 6]. Посебно су ефикасни приступи који обједињују методе дубоког учења и доменску обраду слика, пошто омогућавају јасније издвајање аномалија типичних за структуру ливених делова.

У оквиру овог рада приказана је примена дубоког учења за аутоматску детекцију дефеката на ливеним деловима потопних пумпи, користећи базу података отвореног приступа [1]. Циљ овог рада је приказ примене модела

конволуционе неуронске мреже, како се обучава, тестира и тумачи у контексту реалних индустријских услова. Овим приступом решавају се два изазова: (1) поуздано препознавање дефеката на сликама различитог квалитета и текстуре, и (2) јасно представљање резултата модела тако да буду употребљиви инжењерима који обављају контролу квалитета. Приказани поступак може послужити као основа за развој аутоматизованих система инспекције који се лако прилагођавају потребама производних процеса.

2. Методе

2.1. Опис базе података и припрема података

У истраживању је коришћена база података отвореног приступа која садржи слике ливених делова потопних пумпи у различитим категоријама исправности [1]. Скуп података обухвата 7.348 слика у сивим тоновима величине 300×300 пиксела, насталих применом аугментације, као и додатних 1300 слика већег формата (512×512 пиксела) без аугментације, класификованих као исправни (ок) и дефектни (def). Дефекти на сликама укључују различите облике неуједначености, пукотина, шупљина и неправилности структуре материјала, које су типичне за процес ливења. Овај скуп података садржи примере који одражавају реалне индустријске ситуације.

Пре обуке модела, све слике су нормализоване на опсег вредности пиксела између 0 и 1. Слике већег формата преобликоване су на 300×300 пиксела ради уједначавања улазних димензија. Податке смо поделили на три скупа: тренинг (70%), валидациони (20%) и тест (10%). Аугментација је примењена како би се повећала робусност модела и спречило прекомерно учење модела (overfitting); коришћене су трансформације као што су случајна ротација, хоризонтално и вертикално огледање, померање и мала варијација осветљења, при чему је водило рачуна да се не наруши структура дефекта.

Конволуциона неуронска мрежа

За класификацију слика примењена је конволуциона неуронска мрежа (CNN), која је уобичајени избор за задатке анализе слика због способности да идентификује локалне обрасце, текстуре и сложене структуре. Архитектура модела обухвата више конволуционих и „pooling“ слојева за издвајање карактеристика, након чега следе густо повезани слојеви за финалну класификацију. Нагласак је стављен на ефикасно издвајање визуелних информација релевантних за дефекте који се јављају у ливеним материјалима. У процесу обуке коришћена је бинарна крос-ентропија као функција губитка и оптимизатор „Adam“. Тренинг је спроведен у оквиру Google Colab окружења, са доступним убрзањем преко TPU хардвера, што је омогућило значајно краће време обуке.

2.3. Оцењивање модела и интерпретације резултата

Ефикасност модела оцењивана је помоћу више стандардних метрика: тачност (accuracy), прецизност (precision), осетљивост (recall) и F1-score. Матрична конфузије коришћена је за детаљну анализу класификационих грешака по класама, док је креиран графички приказ тока тренинга и валидације ради праћења стабилности обуке и могућих знакова претренирања. Посебна пажња посвећена је тумачењу рада модела кроз визуелизацију средњих слојева и анализа поља највећег удела у одлуци, што је омогућило боље разумевање начина на који модел издваја дефекте од правилних структуралних елемената.

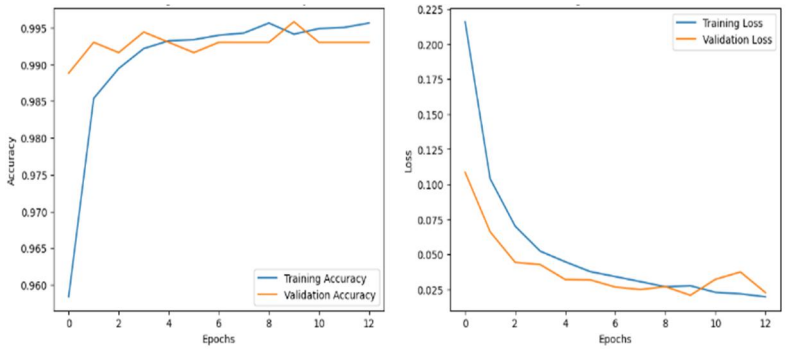
Иако CNN модели постижу високе перформансе, важно је разумети које делове слике модел користи при класификацији. У ту сврху примењене су две категорије метода:

(1) визуелизација активација у конволуционим слојевима, која показује како се образци и текстуре издвајају на различитим дубинама модела;

(2) методе локализације релевантних региона, које омогућавају идентификацију делова слике који имају највећи утицај на резултат класификације.

3. Резултати и дискусија

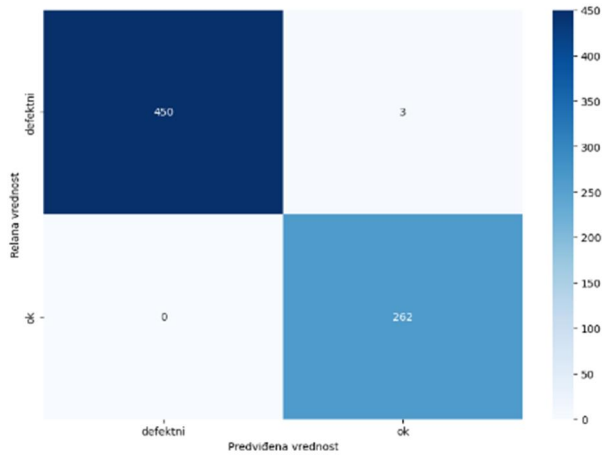
Тачност и губитак модела током 12 епоха приказани су на слици 1. Видљив је стабилан тренд раста тачности, уз истовремено смањење вредности функције губитка како на тренирајућем, тако и на валидационом скупу.



Слика 1. Тачност (лево) и функција губитка (десно) током тренинга и валидације модела CNN

Валидациона тачност остаје висока и прати тренд линију тренинга, што указује да модел није испољио знаке прекомерног учења. Иако се у каснијим епохама јавља благо повећање валидационог губитка, оно не утиче значајно на укупну стабилност и перформансе модела.

На основу матрице конфузије (слика 2) може се уочити да модел постиже високу поузданост при класификацији дефектних и исправних узорака. Од укупно 453 дефектна узорка, 450 је исправно класификовано, док су само три погрешно означена као исправна. Са друге стране, свих 262 исправна одливка класификована су тачно. Овакав резултат указује да модел нема тенденцију да прецени или потцени једну класу, што је чест проблем код неуравнотежених или тешких скупова података.



Слика 2. Матрица конфузије за класификацију дефектних и исправних одливака

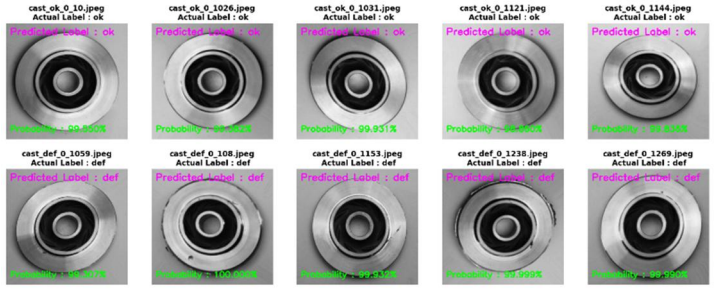
У табели 1 дате су основне метрике класификације. Вредности прецизности, одзива и F1-score су веома високе за обе класе, што додатно потврђује стабилност и уједначено понашање модела.

Табела 1. Поређење резултата различитих метода машинског учења

Класа	Прецизност	Осетљивост	F1-мера	Бр. узорака
0 (дефектни)	1.000	0.993	0.997	453
1 (исправни)	0.989	1.000	0.994	262
Укупна тачност			0.996	715
Macro avg	0.994	0.997	0.995	715
Weighted avg	0.996	0.996	0.996	715

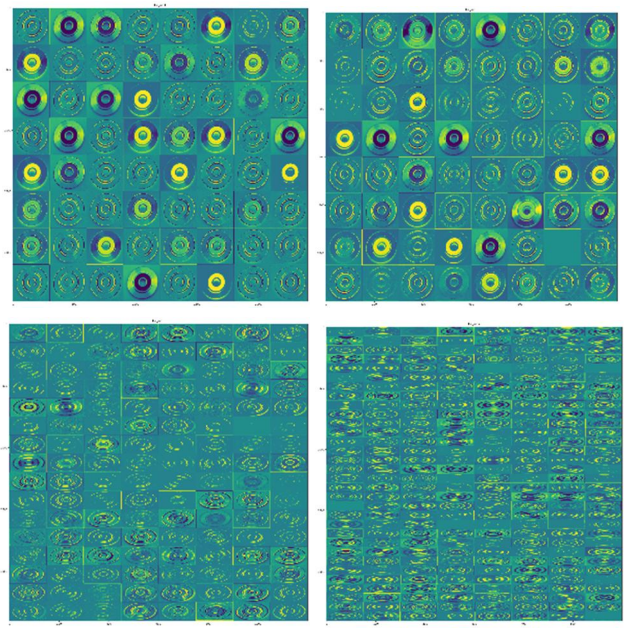
Слика 3 приказује резултате класификације на новим, раније невиђеним узорцима. Модел је успешно идентификовао и исправне и дефектне одливке, уз вероватноће класификације које се у већини случајева налазе изнад 99%. Ово указује да је модел развио стабилне и поуздане структуре карактеристика

које омогућавају доследно препознавање дефеката и у условима који нису идентични тренинг скупу.



Слика 3. Примери предвиђања модела на новим узорцима исправних и дефектних одливака

Визуелизација активација модела (слика 4) пружа увид у то како различити конволуциони слојеви издвајају карактеристике слике.

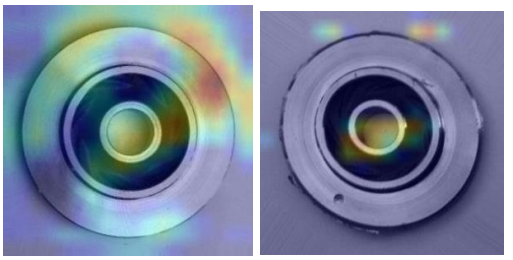


Слика 4. Активације различитих слојева CNN модела: слој 1, слој 3, слој 5 и слој 7

Први слој (Layer 1) акцентује основне облике и ивице, што је у складу са раном фазом обраде слике. Средњи слојеви (Layer 3, Layer 5) идентификују комплексније текстуре и структуре карактеристичне за материјал одливака.

Најдубљи слој (Layer 7) показује апстрактне, вишеслојне обрасце који су резултат комбиновања раније издвојених карактеристика, и најзначајнији су за доношење финалне одлуке модела.

Grad-CAM анализа (слика 5) омогућила је визуелизацију регија које највише утичу на одлуку модела. Код исправних одливака, најактивније регије су концентрисане дуж правилних кружних ивица, што указује да модел правилност геометрије повезује са исправношћу. Код дефектних узорака, активне зоне се јављају у централним или локално нарушеним областима, што одговара местима где се дефекти заиста и јављају. Ови резултати потврђују да модел не „науче“ случајне шаблоне или шум, већ користи структурне карактеристике које су заиста релевантне за металне одливке.



Слика 5. Grad-CAM приказ значајних регија које модел користи при доношењу одлуке за исправан (лево) и дефектан (десно) одливак

Резултати показују да CNN модел постиже изузетно високу поузданост у детекцији дефеката на ливеним деловима, што је у складу са савременим истраживањима у области индустријске инспекције. Високе вредности прецизности и осетљивости, метрика обе класе, указују да модел може бити примењен као основа за систем аутоматске контроле квалитета. Посебно је значајно што визуелизације слојева и Grad-CAM анализе потврђују да модел користи доменски релевантне карактеристике - геометрију, текстуру и локалне неправилности - а не артефакте или шум из позадине. У индустријском контексту, овакав модел може смањити потребу за ручном инспекцијом, повећати брзину и уједначеност процеса, као и благовремено откривати неправилности које нису увек уочљиве голим оком.

4. Закључак

У овом раду приказана је примена метода дубоког учења за аутоматску детекцију дефеката на ливеним деловима потопних пумпи, користећи скуп података отвореног приступа. Примењени модел конволуционе неуронске мреже показао је изузетно високу тачност (0.996), уз врло добре вредности прецизности, осетљивости и F1–мере за обе класе. Анализа матрице конфузије,

визуелизација активација и Grad-CAM мапе показале су да модел препознаје структурне обрасце који су заиста релевантни за дефекте на ливеним деловима, а не случајне артефакте или шум. Ови резултати потврђују да дубоко учење представља поуздан и ефикасан метод за унапређење контроле квалитета у ливарској индустрији.

Иако су постигнуте перформансе изузетне, постоји више праваца у којима се овај приступ може даље развијати. Увођење напреднијих типова слика, као што су рендгенски и CT снимци, омогућило би откривање унутрашњих дефеката недоступних класичним визуелним методама. Класификација по типовима дефеката, а не само бинарна класификација, значајно би проширила практичну примену у производњи. Даље, модел би могао бити унапређен техником локализације дефеката (object detection или segmentation), што би омогућило прецизно означавање положаја оштећења на компонентама. Проширивање скупа података, као и коришћење напредних техника аугментације, допринело би бољој генерализацији модела у различитим индустријским условима.

5. Литература

[1] Ravirajsinh Dabhi, Nevil Kantesaria, Priyank Vaghasia, Jenish Hirpara, Ronak Bhoraniya, dataset: Casting product image data for quality inspection, https://-www.kaggle.com/datasets/ravirajsinh45/real-life-industrial-dataset-of-castingproduct/data, 2020.

[2] Hu, Hao, Shulin Li, Jiaxin Huang, Bo Liu, and Chang Che. Casting product image data for quality inspection with exception and data augmentation. *Journal of Theory and Practice of Engineering Science 3*, no. 10, 42-46, 2023.

[3] Nguyen, Thong Phi, Seungho Choi, Sung-Jun Park, Sung Hyuk Park, and Jonghun Yoon. Inspecting method for defective casting products with convolutional neural network (CNN). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 8*, 583-594, 2021.

[4] Jung, Byeonggil, Heegon You, and Sangkyun Lee. Anomaly Candidate Extraction and Detection for automatic quality inspection of metal casting products using high-resolution images. *Journal of Manufacturing Systems 67*, 229-241, 2023.

[5] Wangzhe Du, Hongyao Shen, Jianzhong Fu, Ge Zhang, Quan He, Approaches for improvement of the X-ray image defect detection of automobile casting aluminum parts based on deep learning, *NDT & E International 107*, 102144, 2019.

[6] Lili Jiang, Yongxiong Wang, Zhenhui Tang, Yinlong Miao, Shuyi Chen, Casting defect detection in X-ray images using convolutional neural networks and attention-guided data augmentation, *Measurement* 170, 108736, 2021.

SISTEM ZA KONSTRUKCIJU GLOBALNIH MAPA IZ MOBILNIH LIDAR SNIMAKA U INDUSTRIJSKIM OKRUŽENJIMA

AUTOMATED CONSTRUCTION OF GLOBAL 3D MAPS FROM MOBILE LIDAR SCANS IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

DALIBOR ŠELJMEŠI[1], VIŠNJA OGNJENOVIĆ[2]
VELIBOR ILIĆ[3], DALIBOR DOBRILOVIĆ[4]
VLADIMIR BRTKA[5], MILAN NIKOLIĆ[6]

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/VI25063S

Rezime: U ovom radu predstavljamo automatizovan sistem za izgradnju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka prikupljenih četvoronožnim robotom Unitree Go2. Sistem obuhvata detekciju preklapanja, point-to-plane ICP registraciju sa procenom kvaliteta, optimizaciju grafa pozicija i konstrukciju prostorno indeksirane mape. Testiran na realnim industrijskim podacima, sistem formira stabilnu glavnu komponentu sa prosečnim RMSE poravnanja od 2.5 cm uprkos ograničenim preklopima i geometrijski siromašnom okruženju. Dobijena mapa omogućava efikasnu primenu metoda mašinskog učenja, uključujući detekciju promena i digitalne blizance u industrijskim objektima.
Ključne reči: mobilni LiDAR, registracija oblaka tačaka, ICP algoritam, optimizacija grafa, 3D mapiranje

Abstract: This paper presents an automated system for constructing global 3D maps from mobile LiDAR scans collected using a Unitree Go2 quadruped robot. The proposed offline

[1]Dalibor Šeljmeši, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, dalibor.seljmesi@uns.ac.rs, ORCID: 0009-0002-9279-8402
[2] Višnja Ognjenović, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, visnja.ognjenovic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4271-4549
[3] Velibor Ilić, Istraživačko-razvojni institut za veštačku inteligenciju, Fruškogorska 1, Novi Sad, velibor.ilic@ivi.ac.rs, ORCID: 0000-0001-5010-1377
[4] Dalibor Dobrilović, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, dalibor.dobrilovic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3083-5725
[5] Vladimir Brtka, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, brtka.vladimir@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7881-9217
[6] Milan Nikolic, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, milan.nikolic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-6643-1442

pipeline includes overlap detection, point-to-plane ICP registration with quality assessment, pose graph optimization, and generation of a spatially indexed global map. Evaluated on real industrial data, the system produces a stable main map component despite limited overlap and geometrically uniform environments, achieving an average alignment RMSE of 2.5 cm. The resulting map is suitable for downstream 3D machine-learning tasks such as change detection and forms a foundation for digital twin applications in Industry 4.0/5.0.
Key Words: mobile LiDAR, point cloud registration, ICP algorithm, pose graph optimization, 3D mapping

1. Uvod

Kontinuirano praćenje stanja industrijskih objekata zahteva pouzdano i frekventno prikupljanje trodimenzionalnih podataka o prostoru. Tradicionalni pristup zasnovan na terestričkom laserskom skeniranju (TLS) obezbeđuje visoku preciznost, ali je logistički zahtevan: zahteva stručnog operatera, planiranje pozicija skenera i ručnu registraciju više snimaka.

Sa razvojem mobilnih robotskih platformi, posebno četvoronožnih robota, otvara se mogućnost automatizovanog mapiranja bez statičkih skenerskih stanica. Slični koncepti autonomne inspekcije i automatske obrade podataka već su uspešno primenjeni i u UAV sistemima za industrijski nadzor, gde kombinacija autonomnog kretanja i metoda računarskog vida omogućava efikasno prikupljanje i obradu informacija o objektima [1].

Unitree Go2 predstavlja stabilnu i pristupačnu platformu koja može autonomno ili poluautonomno da nosi LiDAR senzor kroz kompleksne industrijske okoline.

U ovom radu razvijamo potpuno automatizovan sistem za konstrukciju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka prikupljenih tokom hodanja robota. Sistem obuhvata: (1) inicijalno prostorno filtriranje i downsampling skenova, (2) automatsku detekciju preklapanja između skenova korišćenjem centara i bounding box geometrije, (3) point-to-plane ICP registraciju sa kontrolisanim pragovima kvaliteta, (4) globalnu optimizaciju grafa pozicija, i (5) konstrukciju finalne mape sa prostornim indeksiranjem.

Cilj rada nije razvoj nove ICP varijante ili novog SLAM algoritma, već integracija postojećih metoda u robustan, potpuno autonoman sistem koji može da radi offline nad mobilnim LiDAR snimcima bez ručne intervencije. Praktična evaluacija izvršena je na realnom industrijskom setu podataka u zatvorenom prostoru, pri čemu sistem postiže uspešna registracija sa prosečnim RMSE < 3 cm.

Rezultujuća globalna mapa predstavlja pouzdanu osnovu za dalju analizu, kao što su detekcija promena i digital twin aplikacije. Pored toga, može se koristiti pri standardnoj primeni LiDAR-a u AGV(Automated Guided Vehicles) navigaciji,

praćenju pokretne imovine. Time je konfiguracija ovog sistema primenljiva u Industriji 4.0/5.0, čak i u situacijama kada dolazi do delimičnog ili potpunog prekida konekcije sa internet vezom.

2. Pregled literature

2.1. ICP registracija oblaka tačaka

Klasične metode registracije oblaka tačaka zasnovane su na ICP algoritmu, koji iterativno minimizuje razliku između dva skena [2], [3]. Point-to-plane varijanta se pokazala posebno efikasnom u okruženjima sa velikim brojem ravnih površina, što je čest slučaj u industrijskim objektima. Analize varijanti ICP-a ukazuju da izbor metrike i parametrizacije značajno utiče na konvergenciju i stabilnost [4], dok linearne least-squares aproksimacije [5] predstavljaju standardnu implementaciju u savremenim bibliotekama. Kasnije proširenje metode kroz Generalized-ICP [6] i indoor rekonstrukcije [7] unapređuju stabilnost registracije, dok noviji radovi demonstriraju da i jednostavne ICP varijante mogu biti vrlo konkurentne kada se pravilno podele tačke i inicijalizacije [8].

2.2. Mobilno LiDAR mapiranje četvoronožnim robotima

Savremeni sistemi mobilnog mapiranja zasnovani na četvoronožnim robotima demonstriraju mogućnost pouzdane 3D rekonstrukcije bez statičkih skenerskih stanica. LiDAR-only SLAM pristupi za robotske platforme pokazuju preciznost i u zahtevnim industrijskim okruženjima [9]. Primena Unitree robota u rekonstrukciji enterijera potvrđuje pogodnost ove platforme za automatizovano mapiranje u zatvorenim prostorima [10], [11].

Uporedna istraživanja mobilnog i terenskog laserskog skeniranja pokazuju da mobilni sistemi postižu nižu lokalnu preciznost, ali daleko veću efikasnost prikupljanja podataka [12], [13]. Napredni LiDAR-IMU SLAM pristupi [14] dodatno povećavaju tačnost pri nestabilnom hodu robota, dok se noviji radovi fokusiraju na kombinovanje mobilnih i statičkih skenova radi poboljšanja gustine i pokrivenosti [15].

2.3. Rezime i pozicioniranje rada

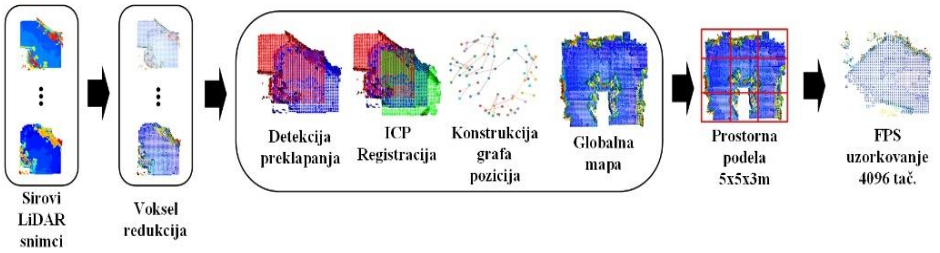
Pregled literature pokazuje da većina postojećih rešenja za mobilno mapiranje teži real-time SLAM sistemima, često uz integraciju IMU senzora, specijalizovanih robotizovanih platformi ili kompleksnih metoda optimizacije. Takvi pristupi zahtevaju dodatnu kalibraciju, hardversku sinhronizaciju i stabilne uslove kretanja, što otežava primenu u industrijskim enterijerima sa ograničenim preklopima i ponavljajućom geometrijom.

Nasuprot tome, ovaj rad se fokusira na offline konstrukciju globalne 3D mape isključivo iz LiDAR sekvenci, bez IMU podataka i bez ručnih intervencija. Time se

postiže jednostavniji, pouzdan i u potpunosti automatski pipeline koji koristi postojeće i dobro proverene tehnike: detekciju preklapanja, point-to-plane ICP i optimizaciju grafa, prilagođene uslovima mobilnih robotskih snimanja u industrijskim okruženjima.

3. Metodologija

Predloženi sistem predstavlja potpuno automatizovan pipeline za konstrukciju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka u industrijskim okruženjima. Proces se sastoji od pet glavnih faza, prikazanih na Slici 1: (1) inicijalna priprema podataka, (2) detekcija preklapanja između skenova, (3) lokalna ICP registracija, (4) konstrukcija i analiza grafa pozicija, i (5) globalno poravnanje i prostorna podela mape.



Slika 1. Dijagram sistema

3.1. Priprema podataka i voxel redukcija

Ulaz u sistem čini sekvenca sirovih LiDAR snimaka prikupljenih tokom hoda robota u zatvorenom prostoru. S obzirom na to da sirovi oblaci tačaka mogu da sadrže stotine hiljada tačaka po skenu, prvi korak je uniformna redukcija gustine metodom voxel grid filtriranja (tipično 2–3 cm). Ova redukcija uklanja redundansu, smanjuje memorijske zahteve i ubrzava kasnije faze, a pri tome zadržava sve relevantne strukture za pouzdanu registraciju.

Tipičan sirovi sken Unitree 4D LiDAR L1 senzora sadrži približno 20–40 hiljada tačaka po okviru (u zavisnosti od brzine rotacije), pri čemu senzor obezbeđuje horizontalni FOV od 360° i vertikalni FOV od 90°, uz efektivnu uzorkovnu frekvenciju od 21 600 tačaka u sekundi. Ove karakteristike obezbeđuju dovoljnu gustinu podataka za pouzdanu ICP registraciju u industrijskim okruženjima.

3.2. Automatska detekcija preklapanja skenova

Da bi se izbeglo registrovanje parova skenova koji se ne preklapaju, između svih kandidata najpre se vrši procena verovatnog preklapanja.

Za svaki par skenova i, j izračunavaju se:

- euklidska udaljenost između njihovih centara,

- razlike prostornog obima (bounding box),
- visinska odstupanja.

Parovi koji zadovolje pragove prostorne blizine ulaze u proces registracije. Ovaj korak značajno smanjuje broj ICP poziva i povećava stabilnost u uniformnim industrijskim okruženjima, gde veliki broj skenova može imati malo korisnih karakteristika.

3.3. Pairwise point-to-plane ICP registracija

Za sve parove skenova za koje je prethodna faza detektovala verovatno preklapanje, primenjuje se metoda point-to-plane ICP. Ova varijanta ICP-a za svaku tačku u izvornom skenu pronalazi najbližu tačku u ciljnom skenu i poravnava skenove tako što minimizuje odstupanje duž normalnog pravca površine.

Ovakav pristup naročito dobro funkcioniše u industrijskim okruženjima sa mnogo ravnih zidova, podova i dugačkih hodnika.

Na kraju registracije čuvaju se sledeći parametri kvaliteta:

- transformacija između dva skena,
- fitness (udeo tačaka koje su uspešno uparene),
- RMSE greške poravnanja.

Registracije koje ne ispunjavaju zadate pragove (npr. dovoljno visok fitness i niska greška) odbacuju se.

3.4. Izgradnja i analiza grafa pozicija

Sve uspešne ICP registracije organizuju se u neusmereni graf, gde čvorovi predstavljaju skenove, a ivice uspešne transformacije.

Analizom povezanih komponenti identifikuje se glavna komponenta, tj. najveći podgraf koji sadrži konzistentno registrovane snimke.

U okviru glavne komponente bira se referentni sken, čvor sa:

- najvećim stepenom (najviše pouzdanih veza),
- najvećom prosečnom fitness vrednošću transformacija.

Ovaj korak garantuje da se globalna mapa gradi iz najstabilnijeg segmenta putanje, čime se izbegavaju lokalne nestabilnosti ICP-a u uniformnim delovima okruženja.

3.5. Globalno poravnanje (multi-hop transformacije)

Nakon što je određena glavna komponenta grafa i izabran referentni sken, potrebno je sve ostale skenove dovesti u njegov koordinatni sistem. Ovo se postiže tako što se za svaki sken pronalazi najkraći put kroz graf do referentnog skena. Na tom putu se nalaze jedna ili više pouzdanih registracija dobijenih ICP-om.

Za svaki sken se zatim primenjuje niz uzastopnih transformacija duž tog puta, tako da se njegov oblak tačaka pravilno poravna sa referentnim koordinatnim okvirom. Na taj način se vrši globalno poravnanje čak i u situacijama kada dva skena nisu direktno registrovana, već su povezani preko trećih skenova. Konačan rezultat ove faze je konzistentna globalna mapa u kojoj su svi skenovi postavljeni u zajednički koordinatni sistem i geometrijski usklađeni. Ovo predstavlja osnovu za izgradnju finalne 3D mape i za dalju prostornu analizu.

3.6. Prostorna podela i Farthest Point Sampling (FPS) uzorkovanje

Kako bi globalna mapa bila pogodna za dalje analize i algoritme dubokog učenja, vrši se podela prostora na uniformne prostorne ćelije dimenzija $5 \times 5 \times 3$ m. Ova podela omogućava ravnomernu organizaciju tačaka u prostoru i sprečava da gusti regioni dominiraju u kasnijoj obradi. Za svaku ćeliju koja pripada globalnoj mapi i sadrži dovoljno tačaka: izdvajaju se sve tačke unutar ćelije, primenjuje se Farthest Point Sampling (FPS) da bi se izdvojilo tačno 4096 reprezentativnih tačaka ravnomerno raspoređenih po zapremini, čuvaju se informacije o poziciji ćelije i broju originalnih tačaka. Ovaj proces obezbeđuje da se svaka prostorna oblast mape dosledno reprezentuje istim brojem tačaka, što je bitno za dalje zadatke kao što su detekcija promena, lokalna registracija ili treniranje modela mašinskog učenja.

4. Eksperimentalno okruženje

Eksperimenti su izvedeni na realnom industrijskom setu podataka prikupljenom u zatvorenom prostoru koristeći četvoronožnog robota Unitree Go2 Pro opremljenog LiDAR senzorom Unitree 4D LiDAR L1. Tokom prikupljanja robot se kretao duž linearne putanje dužine približno 25 metara, pri čemu je LiDAR radio u režimu kontinuiranog skeniranja sa frekvencijom od 10 Hz. Ukupno je prikupljeno 110 LiDAR skenova u formatu PCD. Sirovi podaci obrađeni su potpuno offline, bez IMU informacija i bez GNSS/INS referenci, što predstavlja izazovno okruženje zbog uniformnih površina, ponavljajuće geometrije i ograničenih preklopnih oblasti između uzastopnih skenova. Finalna 3D mapa generisana je kao objedinjeni PCD fajl i prostorno indeksirana u uniformne ćelije pogodne za primenu veštačke inteligencije na 3D podacima. Svi eksperimenti izvršeni su na računary sa procesorom Intel i5-10300H i 16 GB RAM-a. Obrada je realizovana u Python okruženju koristeći biblioteke Open3D, NumPy i SciPy.

5. Rezultati

5.1. Detekcija preklapanja

Od 110 prikupljenih skenova generisano je 5,995 mogućih parova, od čega se 883 (14.7%) kvalifikovalo kao kandidati sa potencijalnim preklapanjem. Time je

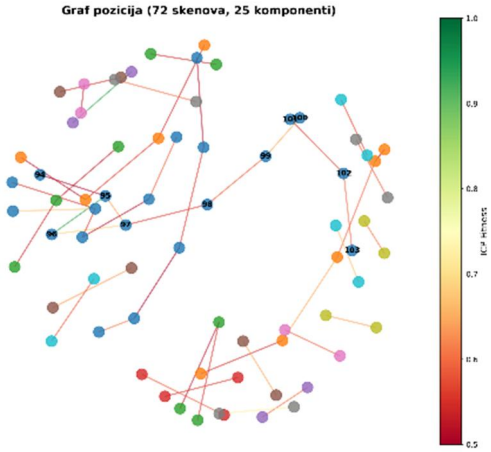
eliminisano 84.1% parova, što značajno smanjuje ukupnu računarsku kompleksnost pipeline-a.

5.2. ICP Registracija

Na 883 kandidata primenjena je point-to-plane ICP registracija. Uslovi kvaliteta (fitness, RMSE i konvergencija) ispunjeni su kod 48 parova (5.4%). Ovaj mali procenat očekivan je zbog geometrijske uniformnosti industrijskog okruženja, kao i uskog vidnog polja Unitree 4D Lidar L1 senzora prilikom linearnog kretanja.

5.3. Struktura grafa

Od 72 skena koji su imali makar jednu validnu ICP registraciju formirano je ukupno 25 povezanih komponenti, pri čemu je najveća (glavna) komponenta obuhvatila 10 skenova i korišćena je za globalno poravnanje i konstrukciju finalne mape. Slika 2 pokazuje da se većina ostalih skenova nalazi u veoma malim komponentama sa jednom ili dve veze, što je tipična posledica ograničenog preklapanja i uniformne geometrije industrijskog okruženja. U takvim uslovima ICP često ne uspeva da pronađe stabilnu transformaciju, pa samo ograničen podskup skenova formira koherentan i dovoljno pouzdan segment za globalnu rekonstrukciju. Glavna komponenta se izdvaja većim brojem međusobno konzistentnih registracija, što ukazuje na stabilnije preklapanje i povoljnije geometrijske uslove u tom delu putanje robota. Tako Slika 2 vizuelno potvrđuje da se stabilna 3D mapa može izgraditi samo iz dela skenova koji čine gustu i dobro povezaną mrežu transformacija.



Slika 2. Struktura grafa pozicija sa 25 povezanih komponenti

5.4. Kvalitet registracije

U okviru glavne komponente postignut je prosečan RMSE od 2.50 ± 0.45 cm i prosečan fitness od 0.592 ± 0.089, što potvrđuje dobro lokalno poravnanje uprkos

malim preklapajućim oblastima. Referentni sken automatski izabran optimizacijom grafa bio je #95. Detaljne metrike kvaliteta registracije prikazane su u tabeli 1.

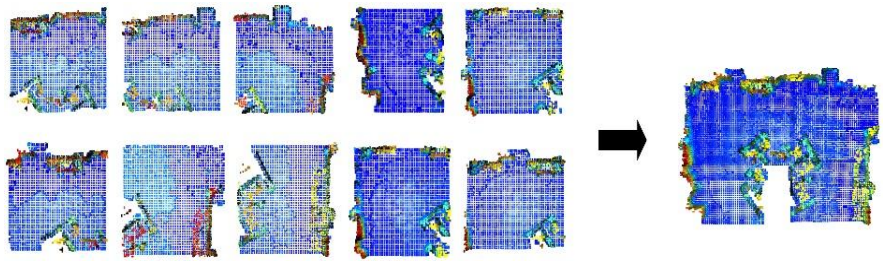
Tabela 1. Sažetak metrika kvaliteta registracije

Metrika	Vrednost
Ukupno skenova	110
Kandidati (preklapanje)	883 (14.7%)
Uspešne ICP registacije	48 (5.4%)
Skenova u grafu	72
Broj komponenti	25
Glavna komponenta	10 skenova (13.9%)
Prosečan RMSE	2.50 ± 0.45 cm
Prosečan fitness	0.592 ± 0.089
Referentni sken	#95 (3 konekcije)

Postignut RMSE (<3 cm) je u skladu sa zahtevima za industrijske aplikacije detekcije promena i uporediv sa rezultatima mobilnog mapiranja prijavljenim u literaturi [13]. Referentni sken automatski izabran optimizacijom grafa bio je #95 sa tri uspešne registracije.

5.5. Finalna mapa

Spajanjem skenova glavne komponente dobijena je konzistentna globalna 3D mapa (slika 3) pogodna za geometrijsku analizu i mašinsko učenje. Mapa je dodatno podeljena na prostorne ćelije i reprezentovana metodom FPS uzorkovanja, čime se omogućava direktna primena modela za detekciju promena i segmentaciju prostora.



Slika 3. Globalna 3D mapa dobijena spajanjem 10 registrovanih skenova

6. Zaključak

U ovom radu predstavljen je automatizovan sistem za konstrukciju globalnih 3D mapa iz mobilnih LiDAR snimaka prikupljenih četvoronožnim robotom u industrijskom okruženju. Iako su uslovi snimanja doveli do ograničenog broja uspešnih

registracija, rezultati pokazuju da je moguće formirati stabilnu globalnu mapu sa preciznim lokalnim poravnanjem (RMSE ≈ 2–3 cm). Sistem eliminiše ručnu registraciju, smanjuje vreme obrade i omogućava ponovljive inspekcije bez ljudske intervencije. Dobijene mape se mogu direktno koristiti za detekciju promena, digitalne blizance i planiranje autonomnih putanja, što predstavlja važan korak ka većoj primeni mobilnog LiDAR mapiranja u pametnim fabrikama i prediktivnom održavanju.

Glavno ograničenje sistema je mala stopa uspešnih registracija u uniformnim delovima hodnika, što je posledica nedovoljnog preklapanja i ograničenog vidnog polja senzora. Budući rad će uključiti integraciju IMU podataka, robustnije lokalne deskriptore i proširenje dataset-a kako bi se poboljšala gustoća i stabilnost globalne mape.

7. Literatura

[1] D. Šeljmeši, V. Ilić, V. Ognjenović, V. Brtka, and D. Dobrilović, Intelligent UAV Surveillance: GIS-Based Path Planning and Post-Flight Object Detection Using YOLOv11 in Proc. *15th Int. Conf. Appl. Internet Inf. Technol*. (AIIT 2025), Bitola, North Macedonia, https://www.researchgate.net/publication/397561933, 2025.

[2] Chen Y, Medioni G, Object Modelling by Registration of Multiple Range Images, *Image and Vision Computing*, 10(3), 145-155, 1992.

[3] Besl P. J, McKay N. D, A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239-256, 1992.

[4] Rusinkiewicz S, Levoy M, Efficient Variants of the ICP Algorithm, Proceedings of the *Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 145-152, 2001.

[5] Low K. L, Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration*, Technical Report TR04-004*, University of North Carolina at Chapel Hill, 2004.

[6] Segal A. V, Haehnel D, Thrun S, *Generalized-ICP*, Proceedings of Robotics: *Science and Systems*, 2009.

[7] Choi S, Zhou Q. Y, Koltun V, Robust Reconstruction of Indoor Scenes, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 5556-5565, 2015.

[8] Vizzo I, Guadagnino T, Mersch B, Wiesmann L, Behley J, Stachniss C, *KISS-ICP:* In Defense of Point-to-Point ICP—Simple, Accurate, and Robust Registration If Done the Right Way, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), 1029-1036, 2023.

[9] Ramezani M, Tinchev G, Iuganov E, Fallon M, Online LiDAR-SLAM for Legged Robots with Robust Registration and Deep-Learned Loop Closure, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 4093-4100, 2020.

[10] Hu D, Gan V. J. L, Yin C, Robot-assisted mobile scanning for automated 3D reconstruction and point cloud semantic segmentation of building interiors, *Automation in Construction*, 152, 104949, 2023.

[11] Gan V. J. L, Hu D, Zhai R, Wang Y, Automated As-built 3D Reconstruction Using Quadruped Robot and 3D LiDAR Sensor, Proceedings of the *39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 129-135, 2024.

[12] Wetzel E. M, Liu J, Leathem T, Sattineni A, The Use of Boston Dynamics SPOT in Support of LiDAR Scanning on Active Construction Sites, Proceedings of the *39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 493-500, 2022.

[13] Thomson C, Apostolopoulos G, Backes D, Boehm J, Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling, ISPRS Annals of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 289-293, 2013.

[14] Zhou Z, Zhang C, Li C, Liu Z, Xu L, Jiang C, A tightly-coupled LIDAR-IMU SLAM method for quadruped robots, *Measurement and Control*, 57(3-4), 399-412, 2024.

[15] Grzelka K, Koszyk J, Ambrozinski Ł, Rucka M, Lachowicz J, Application of mobile laser scanner to augment stationary collected point clouds, *Building Research & Information*, 53(6), 675-699, 2025.

ПРИМЕНА БЛОКЧЕЈН ТЕХНОЛОГИЈЕ И ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У ИНДУСТРИЈИ 4.0

APPLICATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INDUSTRY 4.0

МИРОСЛАВ СТЕФАНОВИЋ[1]
МАРКО ШТАКА[2]
ЂОРЂЕ ПРЖУЉ[3]

Прегледни рад
DOI: 10.5937/VI25073S

Резиме: Индустрија 4.0 означава четврту индустријску револуцију, окарактерисану дигитализацијом, аутоматизацијом и интеграцијом напредних информационих технологија у производне процесе. У овом раду истражује се интеграција блокчејн технологија и вештачке интелигенције у Индустрију 4.0, као савремених реметилачких технологија које су значајан развој доживеле након појаве Индустрије 4.0. Рад приказује теоријски оквир, практичне примере, студије случаја, и анализира перспективе имплементације блокчејн технологије и вештачке интелигенције у Индустрији 4.0.
Кључне речи: блокчејн, вештачка интелигенција, Индустрија 4.0

Abstract: Industry 4.0 marks the fourth industrial revolution, characterized by digitization, automation, and the integration of advanced information technologies into manufacturing processes. This paper examines the integration of blockchain technologies and artificial intelligence into Industry 4.0, as modern disruptive technologies that have experienced significant development following the emergence of Industry 4.0. The paper presents a theoretical framework, practical examples, case studies, and analyzes the prospects for imple menting blockchain technology and artificial intelligence in Industry 4.0.
Key Words: blockchain, artificial intelligence, Industry 4.0

[1] Мирослав Стефановић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, mstef@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0767-365X
[2] Марко Штака, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, marko.staka@uns.ac.rs, ORCID: 0009-0004-5557-9096
[3] Ђорђе Пржуљ, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких науке, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, przulj@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0001-5951-563X

1. Увод

Прошло је више од 10 година од када се термин Индустрија 4.0 појавио по први пут као визија будућности и промена парадигме на коју ће највећи утицај имати напредна дигитализација фабрика, интернет технологије и технологије намењене „паметним“ објектима, попут машина и производа. Тада су као фундаментални концепти Индустрије 4.0 препознати:

- паметне фабрике,
- сајбер-физички системи,
- самоорганизација,
- нови системи у дистрибуцији набавкама,
- нови системи у развоју производа и услуга,
- прилагођавање људским потребама и
- корпоративна друштвена одговорност [1].

Технологије које су 2014. године препознате као покретачи Индустрије 4.0 су од тада доживеле значајан напредак, а неке технологије које су тада биле тек у зачетку данас су препознате као реметилачке технологије које ће имати значајан утицај на читав свет који нас окружује, па тако и на Индустрију 4.0. Када се говори о Индустрији 4.0, технологије које се често препознају као реметилачке су блокчејн технологија и вештачка интелигенција [2]. Блокчејн технологија настала је 2008. године, како би се креирао систем електронског новца подржан од стране чворова, али оно што се данас сматра реметилачком технологијом представља надоградњу овог система, односно такозвани блокчејн 2.0, чија прва имплементација се појавила 2015. године и представља појаву паметних уговора који се извршавају на блокчејн мрежи. Са друге стране, вештачка интелигенција не представља новину у свету информационих технологија, али је велики пробој направљен 2022. године са појавом ChatGPT-а. Управо ово је разлог за спровођење истраживања на који начин ове две технологије могу утицати на Индустрију 4.0.

Поред увода и закључка, у овом раду ће бити представљене основне карактеристике блокчејн технологије у поглављу 2, као и основне карактеристике вештачке интелигенције у поглављу 3, да би у поглављу 4 биле приказане неке од могућности примене блокчејн технологије у Индустрији 4.0, док ће у 5. поглављу исто бити учињено са применом вештачке интелигенције у Индустрији 4.0.

2. Блокчејн технологије

Блокчејн представља имплементацију дистрибуиране књиге трансакција у којој се трансакције чувају у ланцу блокова. Блокови се повезују један на други

и додају хронолошким редом на начин који чини веома мало вероватним да ти блокови могу бити измењени или фалсификовани [3]. Да би се то постигло, блокчејн се ослања на криптографске хеш (енг. *hash*) функције, асиметричну криптографију, кроз примену јавних и приватних кључева, и на дистрибуирани механизам консензуса [4]. Улога механизма консензуса у блокчејн мрежама је да омогући чворовима који се налазе у мрежи да се усагласе око јединственог стања мреже [5]. То значи да се нови блокови додају у ланац само када чворови спроведу исте прорачуне и добију исти резултат и када постигну консензус око тог резултата [6].

Главне предности блокчејн технологије су ефикасност, безбедност, отпорност и транспарентност. Чињеница да је могуће лако пратити и управљати сложеним записима података чини блокчејн технологију ефикасном. Систем је безбедан зато што је фалсификовање података готово немогуће, јер се подаци дистрибуирају између многих повезаних чворова. Дистрибуција података и чињеница да не постоји једна тачка отказа чине систем отпорним, а чињеница да је коришћење система подразумевано јавно чини га транспарентним за сваку заинтересовану страну [7].

Главне карактеристике блокчејн технологије су децентрализација, постојаност, анонимност и ревизабилност [4], [8], [9], [10], [11]. Децентрализација се постиже тако што сваки чвор може да управља трансакцијама и да их складишти. Информације о трансакцијама се размењују између свих чворова у мрежи, и на тај начин се елиминише потреба за постојањем треће стране од поверења [11]. Блокови се додају у ланац тако што се садржај претходног блока, преко хеш вредности блока, укључује у садржај наредног блока. На овај начин постиже се да сваки блок у ланцу учествује у стварању свог следбеника и формирају ланац блокова. Ово подразумева да би промена садржаја неког од претходних блокова, који је већ део блокчејна, поништила све хеш вредности следећих блокова [8]. На овај начин постиже се постојаност трансакција које су забележене у блокчејну. Нове трансакције могу бити додате у блокчејн, док је могућност брисања или ажурирања раније регистрованих трансакција веома мала [10].

Када се говори о анонимности, битно је напоменути да је једна од класификација блокчејн мрежа она која их дели на три категорије, и то: јавне неодобрене (енг. public permissionless) блокчејн мреже, конзорцијумске/хибридне/јавно одобрене (енг. public permissioned) блокчејн мреже и приватне блокчејн мреже [12]. Јавне блокчејн мреже су оне мреже код којих су све трансакције јавне и било ко може да се прикључи мрежи као чвор и учествује у процесу потврђивања трансакција [4], [10]. У конзорцијумским/хибридним/јавно одобреним блокчејн мрежама трансакције су такође јавне, али само

унапред одређени скуп чворова учествује у њиховој потврди. Приватне блокчејн мреже су мреже у којима само одабрани чворови могу да виде и учествују у процесу потврђивања трансакција [13], [14]. Имајући ову поделу у виду, анонимност је карактеристика јавних неодобрених и делимично конзорцијумских/хибридних/јавно одобрених блокчејн мрежа. У овим блокчејн мрежама заинтересоване стране могу учествовати као клијенти размењујући вредност или чак као чвор у јавно неодобреним мрежама, без потребе да открију свој идентитет, чиме се чува њихова анонимност.

У [15], Биткоин (енг. Bitcoin) је описан као peer-to-peer дистрибуирани сервер временских жигова, што значи да су све трансакције које се дешавају у блокчејн мрежи обележене временским жигом. Пошто је свака трансакција временски означена и пошто је фалсификовање веома мало вероватно, као што је раније наведено, заинтересована страна може претраживати блокчејн мрежу ради проналажења било које претходне трансакције, чиме блокчејн постаје ревизабилнан[4], [8].

Биткоин блокчејн, који је креиран 2009. године, имао је ограничену област примене, али се са додатком паметних уговора, који представљају рачунарске програме који су кодирани и унети у блокчејн и чије извршавање подлеже истим правилима која важе и за блокчејн трансакције, домен могуће примене проширио, нарочито у областима државне управе, науке, интернета ствари и здравства [16], [17].

3. Вештачка интелигенција

Током претходних неколико деценија вештачка интелигенција је напредовала од теоријских концепата до једног од најзначајнијих технолошких праваца. Најзначајнији напредак направљен је у последњих десетак година. Напредак хардвера, доступност великих количина података, праћене иновацијама у пољу вештачке интелигенције, креирале су алате који имају могућност решавања великог броја различитих задатака.

Појава великих језичких модела (енг. large language models) довела је до огромног напретка у начину на који машине процесирају, генеришу и разумеју природни језик. Велики језички модели су модели са масивном величином параметара и изванредним могућностима учења [18]. Велики језички модели попут BERT, Claude, GPT-4.5, GPT-5.1, LLaMA-2 показали су одличне резултате у обрађивању природних језика [19]. Посебну пажњу у широкој друштвеној заједници привукао је ChatGPT, подстичући размишљања о снази великих језичких модела и њиховом потенцијалу да помере границе онога што вештачка интелигенција може да постигне. Ова реметилачка технологија

довела је до промене у начину на који комуницирамо са вештачком интелигенцијом и како је користимо у бројним областима, отварајући нове могућности и прилике за иновације [20].

Те прилике за иновацију довеле су до тога да је данас практично немогуће пронаћи област у којој се не врше истраживања везана за могућности примене вештачке интелигенције и за унапређења и иновације до којих њена примена може довести. Једноставним прегледом Web of Science за период од 2022. године до данас, може се пронаћи преко 10.000 радова који представљају систематске прегледе литературе (енг. artificial intelligence systematic review) на тему примене вештачке интелигенције у најразличитијим областима попут здравствене индустрије, образовања, финансија, управљања енергетским сектором, исхраном, безбедности у авио саобраћају, али и Индустрији 4.0.

4. Блокчејн технологија у Индустрији 4.0

Имајући у виду да се блокчејн 2.0 појавио 2015. године, доста брзо након тога, већ 2017. године, компаније су препознале потенцијал примене блокчејн технологије у Индустрији 4.0 кроз примену скалабилности, безбедности и аутономије, као и примену блокчејна као сервера за временску одредницу и почеле су да интегришу блокчејн концепте у своје производне процесе [21]. У [22] блокчејн је, уз сајбер-физичке системе, интернет ствари, велике количине података и вештачку интелигенцију, препознат као технологија која омогућава Индустрију 4.0. Подударање захтева који се постављају пред Индустрију 4.0 и основних карактеристика блокчејн технологије довело је до различитих примена. Детаљна таксономија примене блокчејн технологије у Индустрији 4.0 приказана је у [23]. Препознате су могућности примене у областима здравства, паметних градова, енергетских система, ланаца снабдевања и логистике, финансијског сектора, интернета ствари, производње, управљања дигиталним садржајима и пољопривреди.

У детаљном истраживању спроведеном у [24] у здравственој индустрији, могућности примене блокчејн технологије препознате су у области управљања електронским подацима, у биомедицинском истраживању и образовању, у анализи здравствених података, у удаљеном праћењу пацијената, у фармацеутским ланцима снабдевања и у захтевима везаним за здравствено осигурање. Разлози за избор блокчејн технологије били су контрола приступа подацима, интегритет података, чување података, управљање верзијама података и онемогућавање оповргавања.

У случају паметних градова, који представљају екосистем у којем су управљачки процеси засновани на подацима, аутоматизацији и дигиталној повезаности, како би се повећао квалитет живота, а све то применом интернета

ствари, вештачке интелигенције и анализе података, блокчејн технологија са свим својим карактеристикама има пресудну улогу у томе како паметни градови функционишу [25].

Примена блокчејн технологије у енергетским системима истраживана је у [26], где је препознато да су најзначајније могућности примене везане за иновацију и трансформацију енергетских тржишта, за дељење података и безбедност, за управљање паметним енергетским мрежама, за размену информација између мрежа и корисника и за успостављање peer-to-peer микро енергетских мрежа [26]. У [27] препознато је да се значајан број истраживала бави могућностима примене блокчејн технологије у области управљања ланцима снабдевања, док [28] наводи да су студије случаја показале да примена блокчејн технологије у управљању ланцима снабдевања може унапредити могућност праћења, транспарентности и аутентификације, који су идентификовани као значајни фактори система за управљање ланцима снабдевања [27].

И на крају овог поглавља, посебан осврт на могућности примене блокчејн технологије у производним системима. У [29] препознато је да блокчејн технологије могу унапредити ефикасност, оптимизовати пословне процесе и омогућити анализу података у реалном времену и бити покретач паметних операција.

5. Вештачка интелигенција и Индустрија 4.0

Примена вештачке интелигенције у Индустрији 4.0 доприноси продуктивности, ефикасности и аутоматизацији, али представља и једну од основа за развој аутономних система и робота, што за последицу има да доводи до великог нивоа аутоматизације производним системима [30]. У [31] идентификоване су неке од области примене вештачке интелигенције у Индустрији 4.0 и то паметна производња, одржавање, логистика и складиштење, контрола квалитета, управљање ланцима снабдевања и управљање енергијом.

Када се говори уопштено о примени вештачке интелигенције у Индустрији 4.0 у [32] препознато је да може доћи до решавања значајног броја проблема посебно везано за оптимизовану и робусну контролу аутоматизоване опреме, планирање одржавања, планирања производње, решавање проблема током процеса дизајнирања, контроле робота и интеракцију између човека и робота.

У [33] идентификовано је да вештачка интелигенција може довести до унапређења у процесу одржавања и то кроз могућност удаљеног праћења стања у производним системима, потом у доношењу одлука о системским поправкама и инвестицијама које су засноване на подацима и над којима није било спољних утицаја и да може довести до дужег рада система.

Истраживање о могућностима примене вештачке интелигенције у логистици спроведено је у [34] и препознат је допринос приликом оптимизације процеса оптимизације доношења одлука, унапређења употребе ресурса и унапређења различитих аспеката логистичких операција. Попут примене блокчејн технологије у управљању ланцима снабдевања, која је приказана у претходном поглављу, и вештачка интелигенција је препозната као технологија која може довести до унапређења. Као предности примене вештачке интелигенције у управљању ланцима снабдевања, препознате су: задовољство корисника, уштеде трошкова, унапређена ефикасност, смањивање људских грешака, управљање инвентаром, уштеда времена, управљање ризицима, управљање процесима и унапређени процеси одлучивања [35].

У претходна два поглавља представљен је само део могућности примене блокчејн технологије и вештачке интелигенције и Индустрији 4.0. Оно што се лако да приметити је да у одређеним областима постоје преклапања у примени, те је јасно да ове две технологије нису искључиве, већ да њихова заједничка примена у Индустрији 4.0 може имати ефекат синергије. Као илустрација, примена блокчејн технологије и вештачке интелигенције у управљању ланцима снабдевања истраживана је у [36], [37], [38], док су се истраживањем о примени ове две технологије у производним системима бавили у [39], [40].

6. Закључак

Индустрија 4.0 се у значајној мери ослања на доприносе и унапређења која долазе из развоја информационих технологија. У овом раду представљене су могућности примене блокчејн технологије и вештачке интелигенције у Индустрији 4.0, као две технологије које су направиле најзначајнији напредак након појављивања Индустрије 4.0. Несумњиво је да и ове две технологије могу значајно допринети даљем развоју Индустрије 4.0. Карактеристике блокчејн технологије показују најзначајније могућности примене у управљању ланцима снабдевања, али и у другом областима које могу имати користи од њених карактеристика. Са друге стране, готово је немогуће пронаћи област Индустрије 4.0 у којој вештачка интелигенција неће довести до одређеног унапређења, уз увек јасну свест да се посебна пажња мора посветити етици у вештачкој интелигенцији. Ово показује да интересовање за Индустрију 4.0 и даље постоји и да Индустрија 4.0 „прихвата“ и савремене информационе технологије које могу довести до напретка.

7. Литература

[1] Lasi H, Fettke P, Kemper H, Feld T, Hoffmann M, Industry 4.0, *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239-242, 2014.

[2] Choi T. M, Kumar S, Yue X, Chan H. L, Disruptive Technologies and Operations Management in the Industry 4.0 Era and Beyond, Production and Operations Management, *Production and Operations Management*, vol. 31, no. 1, 2022.

[3] Lu Y, The blockchain: State-of-the-art and research challenges, *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 15, pp. 80–90, Sep. 2019.

[4] Zheng Z, Xie S, Dai H. N, Chen X, Wang H, Blockchain challenges and opportunities: A survey, *International Journal of Web and Grid Services*, vol. 14, no. 4, pp. 352–375, 2018.

[5] Aggarwal S, Kumar N, Chelliah P, Cryptographic consensus mechanisms. *Advances in Computers*, vol. 121, no. 4, pp. 211–226, 2021.

[6] Huo R, Zeng Z, Wang J, Shang W, Chen T, Huang S, Wang R, Yu Y, Liu Y, A comprehensive survey on blockchain in industrial internet of things: Motivations, research progresses, and future challenges. *IEEE Communications Survey & Tutorials* vol. 24, no. 1, pp. 88–122, 2022.

[7] Giancaspro M, Is a 'smart contract' really a smart idea? insights from a legal perspective. *Computer Law & Security Review*, vol. 33 no. 6, pp- 825–835, 2017

[8] Dai H, Zheng Y, Zhang Y, Blockchain for internet of things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp 8076–8094, 2019.

[9] Huo R, Zeng Z, Wang J, Shang W, Chen T, Huang S, Wang R, Yu Y, Liu Y, A comprehensive survey on blockchain in industrial internet of things: Motivations, research progresses, and future challenges. *IEEE Communications Survey & Tutorials* vol. 24, no. 1, pp 88–122, 2022.

[10] Politou E, Casino F, Alepis E, Patsakis C, Blockchain mutability: Challenges and proposed solutions. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 9, pp- 1082–1986, 2021.

[11] Yang L, The blockchain: State-of-the-art and research challenges. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 15, pp. 80–90, 2019.

[12] Woznica A, Kedziora M, Performance and scalability evaluation of a permissioned blockchain based on the hyperledger fabric, sawtooth and iroha, *Computer Science and Information Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 659–678, 2022.

[13] Marjanovic J, Dalcekovic N, Sladic G, Blockchain-based model for tracking compliance with security requirements. *Computer Science and Information Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 359–380, 2023.

[14] Wang S, Ouyang L, Yuan Y, Ni X, Han X, Wang F, Blockchain-enabled smart contracts: Architecture, applications, and future trends. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 49, no. 11, pp. 2266–2277, 2019.

[15] Nakamoto S, Bitcoin: *A peer-to-peer electronic cash system*. https://bitcoin.-org/bitcoin.pdf (2009), accessed: 2024-11-10

[16] Guido R, Mirabelli G, Palermo E, Solina V, A framework for food traceability: Case study–italian extra-virgin olive oil supply chain. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 11, no. 1, pp. 50–60, 2020.

[17] Hassija V, Chamola V, Krishna D, Kumar N, Guizani M, A blockchain and edge-computing-based secure framework for government tender allocation. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 2409–2418, 2021.

[18] Kasneci E, Sebler K, Kuchemann S, Bannert M, Dementieva D, Fischer F, Gasser U, Groh G, Gunnemann S, et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, vol. 103 2023.

[19] Zhao H, Chen H, Yang F, Liu N, Deng H, Cai H, Wang S, Yin D, Du M, Explainability for Large Language Models: A Survey*, ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 1-38, 2024.

[20] Chen J, Liu Z, Huang X, Wu C, Liu Q, Jiang G, Pu Y, Lei Y, Chen X, Wang X, Zheng K. Lian D., Chen E.: When large language models meet personalization: perspectives of challenges and opportunities, *World Wide Web-Internet and Web Information Systems*, vol. 27, no. 4, 2024.

[21] Xua L. D, Xu E. L, Li L, Industry 4.0: state of the art and future trends, *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp 2941-2962. 2018.

[22] Zheng T, Ardolino M, Bacchetti A, Perona M, The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review, *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 6, pp. 1922-1954, 2020

[23] Bodkhei U, Tanwari S, Parekh K, PIMAL Khanpara P, Tyagi S, Kumar N, Alazab M, Blockchain for Industry 4.0: A Comprehensive Review, *IEEE Access*, vol.8, 79764-79800, 2020.

[24] Elangovan D, Long C. S, Bakrin F. S, Tan C. S, Goh K. W, Yeoh S. F, Loy M. J, Hussain Z, Lee K. S, Che A, Ming L. C, The Use of Blockchain Technology in the Health Care Sector: Systematic Review, *JMIR Medical Informatics*, vol.10, no.1, 2022.

[25] Kyriakidis I. N, Papastamatiou C. A, Patsis E. D, Yannakopoulos P, Voyiatzis I, Smart Cities Powered by Blockchain: Building the Foundation, PCI '24: *Proceedings of the 28th Pan-Hellenic Conference on Progress in Computing and Informatics*, pp 364 – 369

[26] Ante L, Steinmetz F, Fiedler I, Blockchain and energy: A bibliometric analysis and review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, 2021.

[27] Risso L. A, Ganga G. M. D, Filho M. G, de Santa-Eulalia L. A, Chikhi T, Mosconi E, Present and future perspectives of blockchain in supply chain management: a review of reviews and research agenda, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 179, 2023.

[28] Sharabati A. A, Jreisat E. P, Blockchain Technology Implementation in Supply Chain Management: A Literature Review, *Sustainability*, vol. 16, no. 7, 2024.

[29] Alazab M, Alhyari S, Industry 4.0 Innovation: A Systematic Literature Review on the Role of Blockchain Technology in Creating Smart and Sustainable Manufacturing Facilities, *Information*, vol. 15, no. 2, 2024

[30] Pimsakul S, Samaranayake P, Laosirihongthong T, Prioritizing Enabling Factors of IoT Adoption for Sustainability in Supply Chain Management, *Sustainability*, vol. 13, no. 33, 2021.

[31] Gabsi A, Integrating artificial intelligence in industry 4.0: insights, challenges, and future prospects-a literature review, *Annals of Operations Research*, vol. 341, no. 2-3, 2024.

[32] Cerqueus A, Dolgui A, Ivanov D, Klimtchik A, Lemoine D, Pashkevich A, Applications of artificial intelligence in industry 4.0 and smart manufacturing, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 149, 2025.

[33] Scaife A. D, Improve predictive maintenance through the application of artificial intelligence: A systematic review, *Results in Engineering*, vol. 21, 2024.

[34] Chen W, Men Y, Fuster N, Osorio C, Juan A. A, Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review, *Sustainability*, vol. 16, no. 21, 2024

[35] Wamba S. F, Guthrie C, Queiroz M. M, Minner S, ChatGPT and generative artificial intelligence: an exploratory study of key benefits and challenges in operations and supply chain management, *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 16, 2024

[36] Gupta S, Modgil S, Choi T. M, Kumar A, Antony J, *I*nfluences of artificial intelligence and blockchain technology on financial resilience of supply chains, *International Journal of Production Economics*, vol. 261, 2023.

[37] Kim S. Y, Alzubi A. A, Blockchain and Artificial Intelligence for Ensuring the Authenticity of Organic Legume Products in Supply Chains, *Legume Research*, vol. 47, no. 7, 2024

[38] Charles V, Emrouznejad A, Gherman T, A critical analysis of the integration of blockchain and artificial intelligence for supply chain, *Annals of Operations Research*, vol. 327, no. 1, pp: 7-47, 2023

[39] Patel D, Sahu C. K, Rai R, Security in modern manufacturing systems: integrating blockchain in artificial intelligence-assisted manufacturing, *Intenational Journal of Production Research*, vol. 62, no. 3, pp. 1041-1071, 2023

[40] Umer M. A, Belay E. G, Gouveia L. B, Fortifying Industry 4.0: Internet of Things Security in Cloud Manufacturing through Artificial Intelligence and Provenance Blockchain-*A Thematic Literature Review*, Sci, vol. 6, no. 3, 2024

ALGORITMI VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U OPTIMIZACIJI TEHNOLOŠKIH PROCESA OBRADE PROIZVODA

ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF PROCESS PLANNING

MIĆA ĐURĐEV[1], MIJODRAG MILOŠEVIĆ[2]
DEJAN LUKIĆ[3], BORIVOJ NOVAKOVIĆ[4]
LUKA ĐORĐEVIĆ[5], VLADIMIR TODIĆ[6]

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/VI25083C

Rezime: Rad prikazuje primenu savremenih algoritama veštačke inteligencije u optimizaciji tehnoloških procesa obrade delova prizmatičnog oblika. Polazi se od koncepta inteligentnih tehnoloških sistema i varijantnosti tehnoloških procesa, pri čemu se optimizacija formuliše kao problem određivanja redosleda zahvata obrade i izbora tehnoloških resursa uz poštovanje ograničenja prethođenja. Posebna pažnja posvećena je biološki inspirisanom metaheurističkom algoritmu – modifikovanom algoritmu vrane (GCSA), koji je prilagođen diskretnoj prirodi problema optimizacije troškova mašinske obrade. Rezultati optimizacije prikazani su za primer jednog prizmatičnog proizvoda.
Ključne reči: tehnološki proces, optimizacija, metaheuristika, modifikovani algoritam vrane

Abstract: The paper presents the application of modern artificial intelligence algorithms in the optimization of production process planning for machining prismatic parts. It is based on

[1] Mića Đurđev, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, mica.djurdjev@tfzr.rs, ORCID: 0000-0002-1825-2754
[2] Mijodrag Milošević, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, mido@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-8950-4867
[3] Dejan Lukić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, lukicd@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1566-282X
[4] Borivoj Novaković, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, borivoj.novakovic@tfzr.rs, ORCID: 0000-0003-2816-3584
[5] Luka Đorđević, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića bb, Zrenjanin, luka.djordjevic@tfzr.rs, ORCID: 0000-0003-4578-9060
[6] Vladimir Todić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad, vladimir.todic@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1111-9117

the concept of intelligent manufacturing systems and the variability of process plans, with optimization formulated as the problem of determining the sequence of machining operations and selecting technological resources while adhering to precedence constraints. Special attention is given to a biologically inspired metaheuristic algorithm - the modified crow search algorithm (GCSA), which is adapted to the discrete nature of the machining cost optimization problem. The optimization results are illustrated using an example of a prismatic part.
Key Words: process plan, optimization, metaheuristic, modified crow search algorithm

1. Uvod

Intenzivan razvoj informacionih tehnologija i njihova primena u proizvodnji doveli su do uvođenja pojma inteligentnih tehnoloških sistema, kao najviše klase fleksibilnih tehnoloških sistema, sposobnih da se efektivno prilagođavaju promenama okruženja uz oslonac na tehnike veštačke inteligencije [1].

U okviru ovakvih sistema, tehnološka priprema proizvodnje dobija ulogu „mosta“ između projektovanja proizvoda (CAD) i projektovanja proizvodnje (CAM), a posebno ulogu u tome ima projektovanje i optimizacija tehnoloških procesa. Tehnološki proces predstavlja deo proizvodnog procesa u okviru kojih se obradom menjaju oblik, dimenzije i svojstva proizvoda. Višestruka varijantnost se javlja u izboru tipa pripremka, redosleda operacija i zahvata, kombinacije mašina alatki, alata, pomoćne opreme i strategija obrade [2, 3]. Zbog toga optimizacija tehnoloških procesa predstavlja kompleksni problem kombinatorne optimizacije, najčešće klasifikovan kao NP-težak, za koji je primena klasičnih, egzaktnih metoda u prihvatljivom vremenu najčešće neizvodljiva. Savremeni trendovi u istraživanjima pokazuju da se problem optimizacije tehnoloških procesa (eng. Process Planning Optimization) uspešno rešava primenom metaheurističkih algoritama, naročito biološki inspirisanih metoda [4].

Cilj ovog rada je da sažeto prikaže koncept primene algoritama veštačke inteligencije u optimizaciji tehnoloških procesa obrade, sa naglaskom na modifikovani algoritam vrane (GCSA), čije su performanse verifikovane na primeru prizmatičnog dela sa 14 tipskih oblika i 20 zahvata obrade.

2. Varijantnost tehnoloških procesa i formulacija problema

2.1. Tehnološki proces kao prostor odlučivanja

Tehnološki proces obrade može se posmatrati kao prostor odlučivanja definisan duž nekoliko osa: izbor faze obrade (operacija), struktura svake operacije (zahvati, prolazi), kao i izbor varijanti celokupnog tehnološkog procesa.

U praksi, za isti mašinski deo moguće je definisati više prihvatljivih varijanti, uslovljenih [2, 3]:

- tipom i geometrijom pripremka,
- strukturom i redosledom operacija i zahvata,
- raspoloživim mašinama alatkama i alatima,
- tehnološkim uslovima i uslovima kvaliteta i proizvodnosti.

Mašinski delovi se tipično opisuju preko tipskih tehnoloških oblika (feature-a) – džepovi, žljebovi, otvori, rupe, stepenici itd. Za svaki tipski oblik mogu se definisati jedan ili više varijantnih redosleda zahvata što utiče da na nivou jednog proizvoda može postojati veliki broj potencijalnih rešenja.

2.2. Varijantnost zahvata i tehnoloških resursa

Varijantnost tehnološkog procesa obrade najizrazitije se manifestuje kroz dva povezana nivoa [5]:

- varijantnost zahvata obrade – izbor tipa zahvata i njihovog redosleda za dati tipski oblik;
- varijantnost tehnoloških resursa – izbor mašine alatke, alata i smera prilaza alata (SPA) za svaki zahvat.

Za svaki tipski oblik najpre se bira odgovarajuća varijanta ili kombinacija zahvata, u skladu sa zahtevima u pogledu tolerancija i kvaliteta obrađene površine. Potom se, za svaki usvojeni zahvat, selektuju odgovarajuće mašine, alati i SPA, čime se formira veliki diskretni prostor potencijalnih redosleda izvođenja zahvata obrade.

Selekcijom varijanti zahvata i resursa za sve tipske oblike dobija se niz celobrojnih vrednosti – permutacija koja opisuje redosled zahvata i dodeljene resurse. Ova permutacija predstavlja hromozom kandidata rešenja u optimizacionom modelu.

2.3. Ograničenja prethođenja

Da bi tehnološki proces bio izvodljiv i tehnologičan, mora da zadovolji veliki broj ograničenja prethođenja (prioriteta) između zahvata, kao i između tipskih oblika. Ona proističu iz [6]:

- dimenzionog prethođenja – uslovljenosti merenja i postizanja traženih dimenzija,
- geometrijskog prethođenja – zavisnosti geometrijskih elemenata,
- tehnološkog prethođenja – neophodnog redosleda obrade (npr. gruba pa fina obrada),
- ekonomskog prethođenja – grupisanja zahvata radi smanjenja troškova i vremena obrade.

Ograničenja se najčešće formulišu preko matrica prethođenja i grafova, kao i preko I/ILI mreža koje ilustruju sve dozvoljene kombinacije redosleda. Njihova

uloga u optimizaciji je dvojaka: obezbeđuju da generisana rešenja budu tehnološki izvodljiva i istovremeno određuju strukturu prostora pretrage [4].

3. Veštačka inteligencija u projektovanju tehnoloških procesa

Metode veštačke inteligencije ušle su u domen projektovanja tehnoloških procesa kroz razvoj CAPP sistema nove generacije. Razlikuju se: metode zasnovane na standardnim podacima i tipizaciji, metode zasnovane na tipskim oblicima, metode bazirane na agentima, i posebno, metode zasnovane na tehnikama veštačke inteligencije. U okviru veštačke inteligencije najveću primenu u CAPP sistemima našli su: ekspertni sistemi, neuronske mreže, genetski algoritmi i fazi logika [7, 8]. Genetski algoritmi su poslužili kao osnova za dalji razvoj šireg spektra biološki inspirisanih metaheurističkih algoritama, koji danas čine jedan od najvažnijih alata za rešavanje problema optimizacije tehnoloških procesa. Optimizacione metode mogu se podeliti na egzaktne i aproksimativne [9]. Egzaktne metode garantuju optimalno rešenje, ali zahtevaju značajne računarske resurse i vreme, zbog čega su za velike diskretne probleme često nepraktične. Aproksimativne metode, među kojima su heuristike i metaheuristike, traže dovoljno dobra rešenja u prihvatljivom vremenu, bez garancije apsolutne optimalnosti.

4. Metaheuristički algoritmi za optimizaciju tehnoloških procesa

4.1. Osnovni pojmovi i podela

Metaheuristike predstavljaju algoritme koji kombinuju lokalno i globalno pretraživanje prostora rešenja, sa ciljem da se izbegne zaglavljivanje u lokalnim minimumima i istovremeno ubrza konvergencija ka kvalitetnom rešenju. Ostvarenje ravnoteže između intenzifikacije (detaljno pretraživanje perspektivnih regiona u prostoru pretraživanja) i diverzifikacije (istraživanje novih regiona) ključno je za njihovu efikasnost [4]. U poslednjim decenijama za rešavanje OTP problema primenjen je veliki broj metaheurističkih metoda: genetski algoritmi (GA), simulirano žarenje (SA), algoritam kolonije mrava (ACO), tabu pretraživanje (TS), optimizacija rojem čestica (PSO), kao i noviji algoritam vrane (CSA/GCSA). Mnoge od ovih metoda dalje su modifikovane ili hibridizovane radi poboljšanja njihovih performansi.

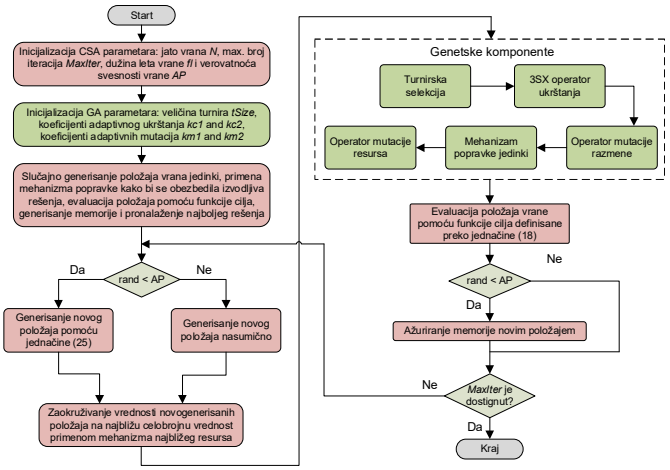
4.2. Modifikovani algoritam vrane (GCSA)

Tradicionalni algoritam vrane (CSA) pripada grupi prirode-inspirisanih algoritama i zasniva se na inteligentnom ponašanju vrana prilikom krađe i skrivanja hrane [10].

Svaka jedinka (vrana) pamti najbolju do sada pronađenu poziciju (skrovište hrane), prati druge vrane i u zavisnosti od verovatnoće „svesnosti“ pokušava da im ukrade rešenje ili da nasumično istražuje nove lokacije. Postupak je definisan kroz

parametre AP – verovatnoća svesnosti, i fl – dužina leta, i populaciju vrana kao nosioca kandidatskih rešenja.

U [4] je razvijen Genetic Crow Search Algorithm – GCSA, koji integriše mehanizam najbližeg resursa, funkciju tehnoekonomske evaluacije i genetske operatore (turnirska selekcija, 3SX ukrštanje, više tipova mutacije) prilagođene diskretnom kodiranju redosleda zahvata i resursa. Na ovaj način povećana je sposobnost algoritma da izbegne lokalne minimume i da bolje iskoristi informacije o strukturi problema. Dijagram toka GCSA algoritma dat je na slici 1.



Slika 1. Dijagram toka GCSA algoritma za optimizaciju tehnoloških procesa [4]

5. Matematičko modeliranje i funkcije cilja

Funkcija cilja u posmatranom istraživanju formulisana je tako da obuhvati tehnoekonomske aspekte tehnološkog procesa obrade. Osnovni kriterijumi kada je u pitanju optimizacija tehnoloških procesa obrade su [1,11,12]:

- ukupni težinski troškovi obrade dela (TWMC),
- ukupno težinsko vreme obrade dela (TWMT).

TWMC se definiše kao linearna kombinacija komponenti vremena:

$$TWMC = w_1 \cdot TMC + w_2 \cdot TTC + w_3 \cdot TMCC + w_4 \cdot TTCC + w_5 \cdot TSC + w_6 \cdot APC \quad (1)$$

gde su:

w_1–w_4 – težinski koeficijenti koji omogućavaju prilagođavanje kriterijuma različitim tehnološkim uslovima.

TMC - Ukupni troškovi rada mašina predstavljaju zbir ukupnih troškova rada svih mašina koje se koriste u okviru tehnološkog procesa.

TTC - Ukupni troškovi korišćenja alata predstavljaju zbir ukupnih troškova alata upotrebljenih u okviru tehnološkog procesa.

TMCC - Ukupni troškovi promena mašina i ukupan broj promena mašina su važni faktori koje razmatraju promene mašina koje se javljaju u slučajevima kada se dva uzastopna zahvata obrade realizuju na različitim mašinama.

TTCC - Ukupni troškovi promena alata i ukupan broj promena alata jednako su značajni faktori kao i prethodni, a odnose se na promene alata u slučajevima kada se dva uzastopna zahvata obrade u okviru vektora Zahvati [1…n] realizuju upotrebom različitih alata.

TSC - Ukupni troškovi promene stezanja dela su troškovi za koje su ključni faktori ukupan broj stezanja i broj promena stezanja u okviru tehnološkog procesa. Do promene stezanja dolazi u slučajevima kada je dva susedna zahvata potrebno realizovati u različitoj pripremi mašine, odnosno primenom različitih SPA.

Funkcija cilja se zatim definiše kao:

$$f_c = max\left(\frac{1}{TWMC}\right) \qquad (2)$$

Ovako definisan model omogućava istovremeno uvažavanje tehničkih i ekonomskih zahteva, a pogodan je za implementaciju u okviru metaheurističkih algoritama koji rade sa populacijom diskretnih rešenja.

6. Eksperimentalna studija

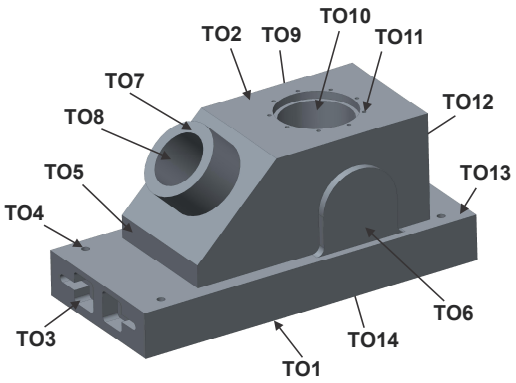
Eksperimentalna studija namenjena verifikaciji performansi GCSA algoritma razmatra jedan reprezentativni primer prizmatičnog proizvoda koji je uveliko korišćen kao test primer u optimizaciji tehnoloških procesa obrade. Ovaj proizvod sadrži 14 tipskih tehnoloških oblika za čiju je obradu potrebno realizovati više operacija sa ukupno 20 zahvata obrade [13].

Ovaj primer pruža mogućnost optimizacije u tri različita tehnološka uslova pri čemu je u ovom radu usvojen prvi tehnološki uslov koji podrazumeva da su prilikom optimizacije raspoloživi svi tehnološki resursi, odnosno sve varijante mašina, alata i smerova prilaza alata.

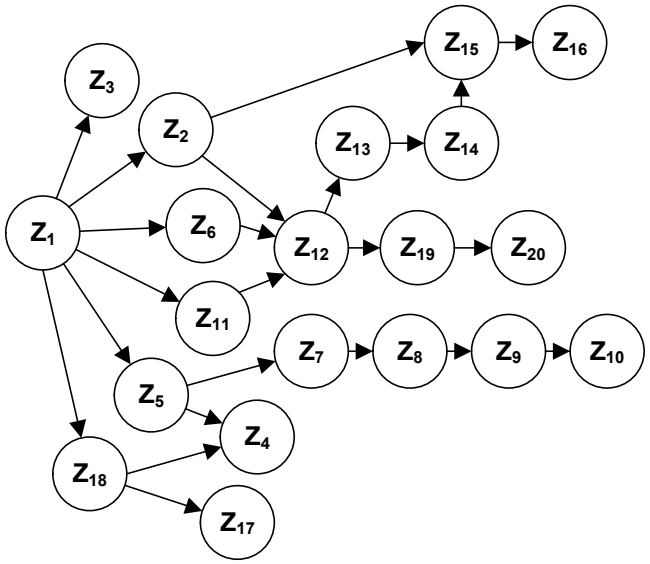
Za prizmatični deo formiran je trodimenzionalni solid model, dok je struktura međuzavisnosti zahvata prikazana grafom prethođenja i odgovarajućom matricom. Graf prethođenja definiše koja obrada mora prethoditi drugoj, uvažavajući dimenzione, geometrijske, tehnološke i ekonomske kriterijume. Matrica prethođenja predstavlja numeričku osnovu za proveru izvodljivosti svakog generisanog tehnološkog

procesa. Na slikama 2 i 3 nalaze se solid model ovog prizmatičnog dela i njegov graf prethođenja na bazi kojeg je sastavljena matrica prethođenja.

Tehnološke informacije koje se odnose na tipske tehnološke oblike, zahvate obrade, raspoložive mašine, alate i smerove prilaza alata, sistematizovane su u tabelama koje predstavljaju dodatne informacije o prizmatičnom delu. Njihov detaljan prikaz može se videti u radu [4].



Slika 2. 3D solid model prizmatičnog dela [4]



Slika 3. Graf prethođenja zahvata za prizmatični deo prikazan na slici 1 [4]

Podešavanje parametara modifikovanog algoritma vrane (GCSA) za prvi tehnološki uslov izvršeno je na osnovu plana eksperimenta, u kome su kao odzivi

posmatrane minimalna i srednja vrednost ukupnih težinskih troškova obrade (TWMC). Dobijeni skup optimalnih parametara definisan je konfiguracijom „GCSA-Par1“, pri čemu je projektovani minimum TWMC iznosio 2440 novčanih jedinica, uz odgovarajuću srednju vrednost od 2510 novčanih jedinica, što ukazuje da je postignuta željena kombinacija odziva za razmatrani uslov.

Na osnovu ovako podešenih ulaznih parametara izvršena je optimizacija tehnološkog procesa obrade prizmatičnog dela. U tabeli 1 prikazani su uporedni rezultati dobijeni GCSA algoritmom sa rezultatima koji su dobijeni primenom tradicionalnih algoritama i savremenih hibridnih i modifikovanih metoda, koje su analizirane u literaturi (PSO, GA, MPSO, CSA, HGGA, HBMO, ACO, TSACO, cPSO, mACO, ESGA, IGA, FSDPSO i CPAGA) za usvojeni tehnološki uslov, za koji su predstavljene minimalne, maksimalne i srednje vrednosti troškova TWMC.

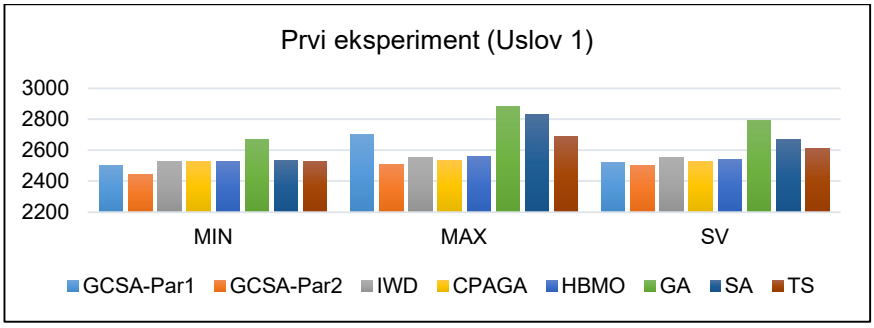
Tabela 1. Uporedni rezultati GCSA i drugih metaheurističkih algoritama za razmatrani prizmatični deo

Algoritam	Srednja vrednost	Maksimum	Minimum
GCSA	2499	2509	2444
HGASA	2546	2585	2527
PSO	2680,5	-	2535
HGGA	-	-	2527
HBMO	2543,5	2557	2525
ACO	2456,1	2527	2435
TSACO	2552,4	2557	2525
cPSO	2629	2687	2520
mACO	2666	-	2530
ESGA	2539,1	2562	2530
IGA	2538,7	2547	2530
FSDPSO	2532	-	2530
CPAGA	2530,5	2535	2530
IWD	2553,5	2554	2527

Uporedna analiza ovih rezultata data je na dijagramu na slici 4, na kojoj su prikazani minimalni, maksimalni i srednji troškovi obrade za GCSA i ostale algoritme za posmatrani prizmatični deo.

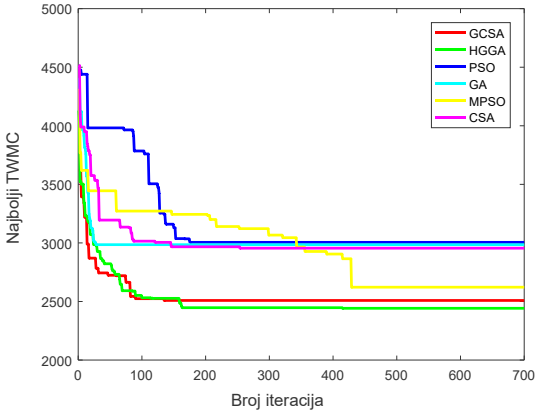
Analiza slike 4 pokazuje da GCSA postiže značajno niže minimalne i srednje vrednosti TWMC u odnosu na većinu uporednih metoda. Dok pojedini algoritmi daju konkurentne minimalne troškove, njihova srednja vrednost i raspon ostvarenih troškova su u pravilu veći, što ukazuje na manju stabilnost i konzistentnost u odnosu

na GCSA. Time se potvrđuje da predloženi algoritam ne samo da pronalazi kvalitetna rešenja, već i da ih ostvaruje u većem broju nezavisnih izvršavanja, što je od posebnog značaja kod diskretnih i teških problema optimizacije.



Slika 4. Dijagrami uporednih rezultata ostvareni različitim metaheurističkim algoritmima za prvi tehnološki uslov

Horizontalna osa dijagrama sa slike prikazuje izlazne rezultate u vidu minimalne, maksimalne i srednje vrednosti troškova TWMC, koji su posebno ostvarili svi metaheuristički algoritmi u ovoj studiji. Vertikalna osa dijagrama označava skalu ukupnih troškova obrade TWMC.



Slika 5. Kriva konvergencije za razmatrani optimizacioni problem

Kriva konvergencije za ovaj optimizacioni problem nalaze se na slici 5. Krive konvergencije pokazuju kretanje optimalne vrednosti kroz iterativni proces algoritama, odnosno približavanje globalnom optimumu. Uobičajeno je da prilikom rešavanja problema minimizacije, kriva ima pad kao što je to slučaj za krive algoritama koje su date na grupnom prikazu na slici 5.

7. Literatura

[1] Petrović M, *Veštačka inteligencija u projektovanju inteligentnih tehnoloških sistema*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2016.

[2] Lukić D, Milošević M, *Integrisani CAPP sistemi i PDM*, Edicija Tehničke nauke – Udžbenici, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2022.

[3] Todić V, Penezić N, Lukić D, Milošević M, *Tehnološka logistika i preduzetništvo*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.

[4] Đurđev M, *Primena savremenih metaheurističkih algoritama u optimizaciji tehnoloških procesa obrade proizvoda*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2021.

[5] Wang J, Kusiak A, *Computational intelligence in manufacturing handbook*. CRC Press, 2000.

[6] Weill R, Halevi G, *Principles of Process Planning-A logical approach*, ed: Chapman and Hall Inc, London, 1995.

[7] Xu X, Wang L, Newman S. T, Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 1, pp. 1-31, 2011.

[8] Teti R, Kumara S. R. T. Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems, *CIRP Annals*, vol. 46, no. 2, pp. 629-652, 1997.

[9] Talbi E. G, *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley & Sons, Inc., 2009.

[10] Askarzadeh A, A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm, *Computers & Structures*, vol. 169, pp. 1-12, 2016.

[11] Nallakumarasamy G, Srinivasan P. S. S, Venkatesh Raja K, Malayalamurthi R, Optimization of operation sequencing in CAPP using simulated annealing technique (SAT), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 5, pp. 721-728, 2011.

[12] Huang W, Hu Y, Cai L, An effective hybrid graph and genetic algorithm approach to process planning optimization for prismatic parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 1219-1232, 2012.

[13] Guo Y. W, Mileham A. R, Owen G. W, Li W. D, Operation sequencing optimization using a particle swarm optimization approach, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, no. 12, pp. 1945-1958, 2006.

ПРОШИРЕНА СТВАРНОСТ У ИНДУСТРИЈИ 4.0/5.0

AUGMENTED REALITY IN INDUSTRY 4.0/5.0

МЛАДЕН ВУКОВИЋ[1], МИЈОДРАГ МИЛОШЕВИЋ[2]
ДЕЈАН ЛУКИЋ[3], ДЕЈАН БОЖИЋ[4]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VI25093V

Резиме: Како индустрија наставља да се развија, Augmented Reality (AR) ће несумњиво играти кључну улогу у обликовању будућности производње. AR прави разлику у производном сектору јер побољшава ефикасност, тачност и безбедност. Користећи уређај који подржава ову технологију, радници имају могућност да приступе информацијама и упутствима у реалном времену. У овом раду се анализира AR као једна од кључних техника виртуелизације физичког света у индустрији и производњи. Дати су и описи неки од софтверских пакета која се користе у развоју AR система у производним окружењима и који су коришћени у развоју апликације за препознавање машинских компоненти.
Кључне речи: Индустрија 4.0/5.0, Проширена стварност, Unity, Vuforia

Abstract: As the industry continues to evolve, Augmented Reality (AR) will play a key role in shaping the future of manufacturing. AR is making a difference in the manufacturing sector by improving efficiency, accuracy, and safety. Using a device that supports this technology, operators have the ability to access information and instructions in real time. This paper analyzes AR as one of the key techniques for virtualizing the physical world in industry and manufacturing. It also describes some of the software packages used in the development of AR systems in manufacturing environments and which were used in the development of an application for recognizing machine components.
Key Words: Industry 4.0/5.0, Augmented Reality, Unity, Vuforia

[1] Младен Вуковић, OCSiAl Balkan DOO, Балканска 21, Београд, plexusstudio@-yahoo.com
[2] Мијодраг Милошевић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, mido@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-8950-4867
[3] Дејан Лукић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, lukicd@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-1566-282X
[4] Дејан Божић, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, bozic997dejan@uns.ac.rs, ORCID: 0009-0009-1095-8101

1. Увод

Проширена стварност (Augmented Reality – AR) је технологија којом се уз примену одговарајуће опреме и апликација, видљиви (реални) свет преклапа са слојем дигиталног садржаја [1]. Ово је помоћни систем (Assisted Operator) који се користи у логистици, одржавању, монтажи итд. Проширену стварност представља непосредни или индиректни приказ физичког окружења у стварном свету који је побољшан/допуњен додавањем виртуелних рачунарских информација. AR је интерактивна технологија у 3D формату и комбинује стварне и виртуелне објекте. Проширена стварност има за циљ да помогне кориснику тако што виртуелне информације приказује, не само у непосредном корисничком окружењу, већ омогућава и било који индиректни поглед на окружење у стварном свету. AR побољшава перцепцију и интеракцију корисника са стварним светом [2].

AR се такође може користити за појачавање чула корисника сензорском супституцијом, помоћу аудио или визуелних сигнала. Виртуелни објекти интегрисани у стварно окружење приказују информације које корисник не може директно регистровати својим чулима [3]. Информације које преносе виртуелни објекти могу нпр. помоћи раднику при обављању активности у производном процесу.

Када говоримо о AR и њеној способности да интегрише дигиталне информације у реални свет, постоје одређени предуслови који омогућавају ову технологију. Наравно, у питању су хардвер и софтвер [4]. Корисник, кроз наочаре за виртуелну стварност или екран телефона или таблета, види слику стварног света снимљену камером, на коју се надограђују дигитални садржаји у облику текста, слика или 3D модела, слика 1. Ове додате информације имају различите сврхе и могу се прилагођавати у складу са потребама или специфичностима индустрије.

Слика 1. Приказ дигиталног садржаја у комбинацији са стварним светом

Већина напредних AR уређаја базирана је на SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) технологији. Ова технологија омогућава уређају да стекне динамичко разумевање корисниковог непосредног окружења, тако да дигитални елементи могу бити постављени у окружење или чак генерисани од стране окружења на начине који имају смисла за посматрача, слика 2.

Слика 2. Преклапање дигиталног модела са физичким моделом

Праћење омогућава апликацији да разуме позицију и оријентацију објекта у простору. Ово може омогућити захтевнијим апликацијама да раде у динамичким окружењима, али је то такође основа за неке нове корисничке интерфејсе. Док препознавање објеката и слика омогућава апликацији да представи информације засноване на окружењу, просторни AR омогућава корисницима да поставе дигиталне елементе у AR приказ окружења. Они могу укључивати моделе, белешке или друге врсте напомена које остају „усидрене“ за ту позицију у простору за њихову будућу референцу, а често и за друге кориснике [5].

2. Намена AR у производњи и индустрији

У производњи и индустрији, AR се може користити за различите намене. У наставку су дате области примене AR у оквиру производних, односно индустријских окружења.

2.1. Побољшање обуке и вештина радника

Проширена стварност нуди јединствену прилику за револуцију у обуци радника и развоју вештина у Индустрији 4.0. Пружајући интерактивна упутства и упутства у реалном времену, AR може значајно смањити криву учења за нове запослене.

Радници могу преклопити дигиталне инструкције, дијаграме и симулације са машинама на свом радном месту, што им омогућава да ефикасније науче сложене задатке, слика 3.

2.2. Израда инструкција за монтажу

AR помаже процес склапања у производњи преклапањем дигиталних инструкција директно на делове из стварног света, водећи раднике корак по корак. Ово минимизира грешке, јер запослени могу визуелно да прате сваку фазу склапања са упутствима и анимацијама у реалном времену. AR алати такође могу да истакну критичне компоненте или области у којима је прецизност кључна, осигуравајући тачност и квалитет. Поред тога, AR може да прикаже 3D моделе, чинећи сложене делове лакшим за разумевање и смањујући време обуке за нове раднике. Дакле, AR повећава ефикасност, побољшава квалитет и омогућава брже криве учења у процесу склапања производа, слика 4.

Слика 3. Учење на радном месту помоћу AR апликације

Слика 4. Интерактивна упутства за монтажу са препознавањем делова

2.3. Идентификација делова и опреме

AR побољшава препознавање делова у производњи идентификацијом компоненти у реалном времену и приказивањем релевантних информација на екрану, слика 5. Радници могу брзо да скенирају делове помоћу AR уређаја, који их аутоматски препознају и приказују кључне детаље као што су спецификације, број делова и компатибилност. Овај поједностављени процес идентификације смањује могућност коришћења нетачних делова и убрзава мон-

тажу и одржавање. Поред тога, AR пружа тренутни приступ листама резервних делова, омогућавајући радницима да виде расположиви инвентар, наруче замене или пронађу одговарајуће алтернативе без напуштања свог радног места. На овај начин се побољшава ефикасност и смањује време застоја осигуравајући да су прави делови лако доступни.

Слика 5. AR апликација за идентификацију компоненти

2.4. Омогућавање сарадњу на даљину – Виртуелни асистент

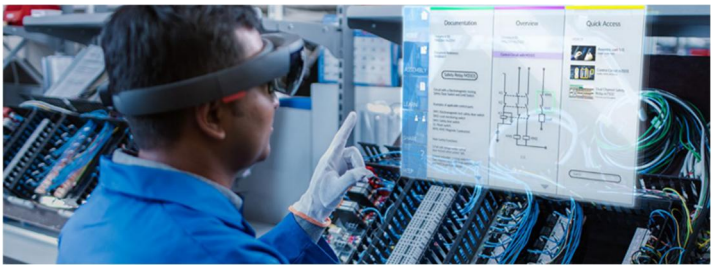
AR омогућава даљинску сарадњу међу тимовима, без обзира на географску локацију. Преко уређаја који подржавају AR, радници могу да деле своје погледе у реалном времену, бележе објекте и комуницирају са колегама, стручњацима или супервизорима, слика 6.

Слика 6. Даљинска колаборација и стручна помоћ

Преко уређаја који подржавају AR, техничари могу да добију упутства у реалном времену од стручњака који се налазе на некој другој локацији. Стручњаци могу даљински да дијагностикују проблеме, дају упутства корак по корак, па чак и да пребаце виртуелне алате у видно поље техничара. Ова могућност смањује потребу за посетама на лицу места, убрзава процесе одржавања и обезбеђује ефикасно решавање проблема.

2.5. Побољшање контроле квалитета и инспекције

У Индустрији 4.0, одржавање стандарда високог квалитета је кључно. AR може побољшати контролу квалитета и процес инспекције комбиновањем дигиталних информација са физичким објектима, слика 7.



Слика 7. AR процедура за контролу квалитета

AR може да истакне недостатке и неправилности на готовом производу који су могли промаћи голом оку или да пружи упутства за инспекцију корак по корак и упореди податке у реалном времену са унапред дефинисаним стандардима. Ова технологија обезбеђује доследност, тачност и смањује људске грешке, што резултује побољшаним квалитетом производа и задовољством купаца.

2.6. Побољшање дизајна производа и израде прототипа

Проширена стварност револуционарно мења фазу пројектовања производа и фазу израде прототипа у Индустрији 4.0/5.0. Пројектанти могу да визуелизују производ и манипулишу виртуелним 3D моделима у реалним окружењима, што им даје могућност да процене изводљивост, ергономију и естетику дела који пројектују, слика 8.

Слика 8. Визуелизација пројектованог дела у стварним димензијама

AR такође омогућава брзу израду прототипа, где виртуелни прототипови могу да се тестирају и модификују у реалном времену, смањујући време до пуштања производа на тржиште и трошкове развоја.

2.7. Повећање безбедности радника

AR може допринети побољшању безбедности радника у производним окружењима. Преклапањем безбедносних упутстава, упозорења о опасностима и података о потенцијалним ризицима у реалном времену, AR може помоћи радницима да се безбедније крећу у свом окружењу. AR може да истакне опасне области или да пружи смернице за правилно руковање опасним материјалима, слика 9. Ова технологија промовише безбедније радно окружење, смањује несреће и ризик од повреда.

Слика 9. Упозорење на лицу места у индустријском окружењу

2.8. Подршка JIT производњи

Just In Time (JIT) производња је кључни принцип у Индустрији 4.0/5.0, са циљем да се минимизују залихе и оптимизује ефикасност производње. Проширена стварност може допринети JIT производњи пружањем информација у реалном времену о нивоима залиха, распореду производње и подацима о ланцу снабдевања. Радници могу приступити овим информацијама преко AR уређаја, што им обезбеђује праве информације у право време, смањујући шкарт и побољшавајући укупну ефикасност производње, слика 10.

Слика 10. Стање залиха у реалном времену

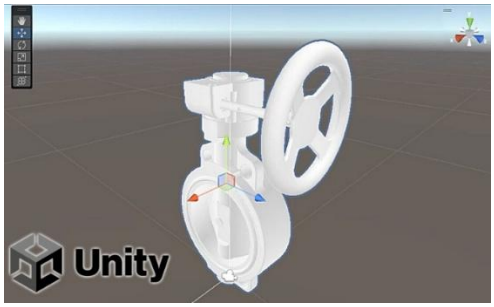
3. Примена софтверских пакета *Unity* и *Vuforia* у AR

У домену AR за индустријску примену, наметнула се компанија PTC са својим софтвером Vuforia. Ова компанија је позната по софтверима Creo

(CAD/CAM) и OnShape (Cloud CAD). Vuforia има неколико својих подваријанти, од самосталне верзије под именом Vuforia Studio која је комерцијално решење намењено великим бизнисима, до бесплатне верзије. Ово је, заправо, надоградња на Unity окружење које је намењено за креирање компјутерских игара и виртуелних светова.

3.1. Unity окружење

Unity Engine је корисно и свестрано мулти-платформско окружење које се често користи за развој интерактивних 2D, 3D, VR i AR апликација [8]. Unity пружа интуитивно развојно окружење са широким скупом алата, укључујући визуелни едитор, робустно окружење за физичке и кинематске симулације, као и подршку C# програмски језик. Када је интегрисан са Vuforia Engine, Unity проширује своје AR могућности, омогућавајући програмерима да креирају апликације које препознају и комуницирају са објектима из стварног света, слика 11.



Слика 11. Развој Unity AR апликативног решења за препознавање вентила

Unity окружење омогућава развој AR апликативног програмског решења које се може користити у препознавању машинских компоненти. Овакво решење се може прилагођавати различитим уређајима и оперативним системима. Једна од главних карактеристика Unity окружења је развој пројеката за различите платформе. Пројекти креирани у овом окружењу могу се извршавати на 27 различитих платформи [8].

3.2. Софтверски пакет Vuforia

PTC Vuforia је напредна AR платформа која користи камеру да идентификује и прати слике, објекте и просторне карактеристике [9]. Програмери могу да искористе Unity алате за рендеровање и управљање сценом заједно са Vuforia могућностима препознавања и праћења, омогућавајући прецизно преклапање виртуелних елемената на физичке предмете у апликацијама као што су индустријско препознавање модела и навођење корисника. Vuforia је

софтверска платформа која омогућава програмерима да креирају AR апликације за мобилне уређаје и AR наочаре. На слици 12 је приказана примена AR технологије у препознавање машинских компоненти вентила. Крајњи циљ је лакша идентификација делова, склопова и производа у великим фабричким и производним погонима. На овај начин се обезбеђује лакше одржавање машина, уређаја и опреме, као и ефикаснија замена делова.

Слика 12. Vuforia AR апликација за препознавање машинских компоненти

Vuforia подржава алате за креирање и управљање различитим типовима AR садржаја на различитим платформама (Android, iOS i Microsoft). Приликом виртуелизације се користи неколико различитих технологија за препознавање простора и позиционирање виртуелног садржаја у реално окружење. Те технологије укључују позиционирање помоћу: 2D графике – Image Targets, бар кодова и QR кодова – Barcode Scanner, специјално дизајнираних графичких мета – VuMarks, графичких мета у облик цилиндра – Cylinder Targets, графичких мета у облик кутије – Multi-Targets, детекције 3D модела – Model Targets, детекције равни у простору коришћењем сензора удаљености на телефону – Ground Plane и детекције простора – Area Targets.

4. Закључак

Проширена стварност је спремна да револуционарно промени производни сектор у Индустрији 4.0. Она надограђује производне процесе и праксе. Њене примене у обуци радника, производним процесима, контроли квалитета, даљинској сарадњи и пројектовању производа трансформишу традиционалне производне прилазе. Користећи AR, компаније могу побољшати продуктивност, смањити трошкове, побољшати квалитет производа и подстаћи иновације. Већ сада је реално очекивати да ће се наћи решење за повезивања ERP, MES, SCADA, PLC и AR апликације како би се директно у фабричком погону добиле све информације у реалном времену на преносивом уређају попут

таблета или телефона. Такво решење ће допринети бржем реаговању у промени технолошких параметара, превентивном и хаваријском одржавању, повезивању са магацином резервних делова, као и релевантним информацијама о добављачима и роковима испоруке.

Увођење у индустријске процесе нових инжењера и радника помоћу AR апликација ће довести до бржег оспособљавања за рад као и боље разумевање производног процеса и опреме са којом се рукује и која се одржава. Дигитални близанац фабрике у уређају који стане у џеп са комплетним информацијама о сваком делу опреме је ултимативни циљ оваквих решења.

5. Литература

[1] Милошевић М, *Индустрија 4.0 – Дигиталне технологије у производном процесу,* Поглавље *у књизи ИНДУСТРИЈА 4.0 – Дигитална трансформација обликује будућност*, стр. 1–20, Друштво за роботику у БиХ – Бихаћ, Академија наука и умјетности, Сарајево, 2024.

[2] Carmigniani J, Furht B, Anisetti M, Ceravolo P, Damiani E, Ivkovic M, Augmented reality technologies, systems and applications, *Multimedia Tools and Applications*, 51, pp. 341–377, Springer, doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6, 2011.

[3] Lukić D, Milošević M, *Интегрисани CAPP системи и PDM*, Едиција Техничке науке – уџбеници, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2022.

[4] Fang W, Chen L, Zhang T, Chen C, Teng Z, Wang L, Head-mounted display augmented reality in manufacturing: A systematic review, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102567, 2023.

[5] Marino E, Barbieri L, Bruno F, Muzzupappa M, Assessing user performance in augmented reality assembly guidance for industry 4.0 operators, *Computers in Industry*, 157–158, 104085, doi.org/10.1016/j.compind.2024.104085, 2024.

[6] Amouzgar K, Willebrand J, A novel XR-based real-time machine interaction system for Industry 4.0: Usability evaluation in a learning factory, *Journal of Manufacturing Systems*, 82, pp. 254–283, 2025, doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.-05.019.

[7] Treinen T, Keshav Kolla S. S. V, Augmented Reality for Quality Inspection, Assembly and Remote Assistance in Manufacturing, *Procedia Computer Science*, 232, pp. 533–543, 2024, doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.053.

[8] unity.com/products/unity-engine – Приступ: Новембар, 2025.

[9] www.ptc.com/en/products/vuforia – Приступ: Новембар, 2025.

УЛОГА ВЕШТАЧКЕ ИНТЕЛИГЕНЦИЈЕ У УНАПРЕЂЕЊУ САЈБЕР БЕЗБЕДНОСТИ

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN IMPROVING CYBERSECURITY

ЈЕЛЕНА МАРЈАНОВИЋ[1]
СТЕВАН СТАНКОВСКИ[2]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VI25103M

Резиме: Вештачка интелигенција (ВИ) постаје кључни фактор у унапређењу сајбер безбедности кроз све фазе животног циклуса софтвера – од развоја до продукције. У фази развоја софтвера, ВИ омогућава аутоматску анализу кода, детекцију рањивости и предиктивно моделирање ризика. Током тестирања и имплементације, користи се за симулацију напада и оптимизацију сигурносних процедура. У продукцији, ВИ обезбеђује континуирани мониторинг, детекцију аномалија и адаптивни одговор на претње у реалном времену. Овај рад истражује како ВИ унапређује сигурност софтверских система, трансформише традиционалне приступе заштити и поставља темеље за интелигентне системе сајбер одбране.

Кључне речи: Вештачка интелигенција, предикција, системи сајбер одбране

Abstract: Artificial Intelligence (AI) is becoming a key factor in advancing cybersecurity throughout all phases of the software lifecycle—from development to production. In the development phase, AI enables automated code analysis, vulnerability detection, and predictive risk modeling. During testing and implementation, it is used for attack simulation and optimization of security procedures. In production, AI provides continuous monitoring, anomaly detection, and adaptive real-time threat response. This paper explores how AI enhances the security of software systems, transforms traditional protection approaches, and lays the foundation for intelligent cyber defense systems.

Key Words: Artificial Intelligence, Prediction, Cyber defense systems

[1] Јелена Марјановић, Digital energy division, Schneider electric, Индустријска 3г, Нови Сад, jelena.marjanovic@se.com, ORCID: 0000-0002-8363-6228

[2] Стеван Становски, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад, stevan@uns.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4311-1507

1. Увод

Развој софтверских система пролази кроз различите фазе животног циклуса, а избор одговарајуће методологије има кључну улогу у квалитету и ефикасности испоруке. Традиционални Waterfall модел представља линеаран и секвенцијалан приступ, где се свака фаза – од анализе захтева до одржавања – завршава пре преласка на следећу. Овакав приступ обезбеђује висок ниво документације и предвидљивости, али је мање флексибилан када дође до промена у захтевима пројекта [1]. У фази тестирања, вештачка интелигенција (ВИ) се користи за генерисање тест случајева и симулацију напада, док у продукцији обезбеђује континуирани мониторинг и детекцију аномалија. Међутим, ригидност Waterfall модела отежава брзу адаптацију нових ВИ алата, што представља ограничење у динамичним окружењима [6].

Насупрот томе, Agile методологија уводи итеративни и инкрементални развој, фокусиран на адаптивно планирање, сталну сарадњу са корисницима и брзу испоруку функционалних делова система. Agile омогућава тимовима да се брзо прилагођавају променама и смањују ризик неуспеха кроз континуиране повратне информације [2]. Agile методологија, заснована на итеративном развоју, пружа идеалан оквир за интеграцију ВИ. У раним спринтовима ВИ може аутоматски анализирати код и открити рањивости, док у каснијим итерацијама омогућава real-time threat intelligence и адаптивни одговор на претње. ВИ подржава континуирану процену ризика и оптимизацију сигурносних процедура, чиме се смањује ризик од пропуста у брзим циклусима испоруке [7], [8].

У последњој деценији, појављује се DevOps као еволуција Agile приступа, са циљем интеграције развоја и операција. DevOps наглашава аутоматизацију, континуирану интеграцију и испоруку (CI/CD), као и културу сарадње између тимова, чиме се убрзава процес испоруке и побољшава квалитет софтвера [3], [4]. Овај приступ не само да смањује време до тржишта, већ и омогућава брже откривање и отклањање грешака, уз повећање поузданости система [5]. DevOps, а посебно његов сигурносни проширени облик.

DevSecOps, представља најпогоднији оквир за примену ВИ. Интеграција ВИ у CI/CD pipeline омогућава:

- Аутоматско скенирање кода и детекцију рањивости пре продукције.
- Предикативну аналитику за идентификацију потенцијалних напада.
- Аутоматизовано тестирање и инцидент response, смањујући људске грешке и убрзавајући реакцију на претње. Овај приступ обезбеђује континуирану заштиту и адаптивни одговор у реалном времену, што је кључно за cloud-native и микросервисне архитектуре [9], [10].

У савременом окружењу, где се софтверски системи развијају у динамичним и комплексним условима, сајбер безбедност постаје кључни фактор квалитета и поузданости. Традиционални приступи заштити, засновани на статичким контролама и ручним проверама, више нису довољни да одговоре на софистициране претње. Вештачка интелигенција (ВИ) уводи парадигму проактивне и адаптивне заштите, интегрисане кроз све фазе животног циклуса софтвера (SDLC), узимајући у обзир различите методологије развоја.

2. Преглед доступних алата ВИ у безбедном развоју

Вештачка интелигенција постаје кључни елемент у унапређењу сајбер безбедности у свим фазама животног циклуса софтвера, а њен утицај је посебно видљив када се интегрише у различите методологије развоја – Waterfall, Agile и DevOps. Свака од ових методологија има специфичне карактеристике које обликују начин на који се безбедност имплементира, а ВИ алати омогућавају да се традиционални приступи трансформишу у проактивне, аутоматизоване и адаптивне процесе.

У Waterfall моделу, где се кораци извршавају секвенцијално, ВИ омогућава рано откривање безбедносних ризика и минимизирање трошкова касних измена. У Agile окружењу, које се заснива на честим итерацијама и брзој испоруци, ВИ подржава тимове кроз континуирану анализу кода, аутоматско тестирање и предвиђање ризика у сваком спринту. DevOps методологија, са својим нагласком на континуираној интеграцији, достави и надзору, додатно добија на вредности употребом ВИ у аутоматизацији безбедносних провера, анализи аномалија и откривању напада у реалном времену. Комбинација ових техника омогућава организацијама да граде безбедније, софтверске системе које је лакше одржавати и унапређивати у условима савременог развоја.

ВИ у Waterfall методологији

У фази пројектовања и развоја, ВИ алати попут Checkmarx и SonarQube користе машинско учење за статичку анализу кода и откривање рањивости пре него што софтвер пређе у следећу фазу [11]. Генеративни алати ВИ се све више користе за аутоматско генерисање сигурносних тестова и предвиђање потенцијалних ризика на основу историјских података и образаца у коду [12]. У тестирању, ВИ омогућава симулацију напада и динамичку анализу апликација (DAST), чиме се смањује ризик од касних открића рањивости. Google OSS-Fuzz је пример алата који користи ВИ за откривање грешака у open-source пројектима, што је посебно значајно у Waterfall окружењу где су касне промене скупе [13].

Поред тога, ВИ алати се све чешће интегришу у фазу прикупљања захтева, где помажу у идентификацији недоследности и потенцијалних функционалних празнина у документацији. У овој раној фази, системи засновани на обради природног језика (NLP) могу аутоматски анализирати спецификације и предложити побољшања или упозорити на двосмислене формулације које би касније могле довести до скупих измена. У фази имплементације, ВИ може аутоматски давати препоруке програмерима, нудити оптимизације кода у реалном времену и указивати на anti-patern који би могли угрозити архитектуру. На нивоу контроле квалитета, ВИ убрзава процес регресионог тестирања генерисањем оптимизованих скупова тестова који покривају критичне путање система. У оквиру финалне валидације, ВИ модели могу предвидети вероватноћу грешака након пуштања у рад и предложити додатне мере за побољшање стабилности система, што Waterfall процес чини предвидљивијим и ефикаснијим.

ВИ у Agile методологији

Агиле методологија, заснована на итеративном развоју и брзим циклусима, захтева континуирану интеграцију безбедносних провера. ВИ се овде користи за аутоматизацију тестирања, генерисање тест случајева и предиктивну анализу ризика у реалном времену. Алати попут Snyk и GitHub Advanced Security примењују машинско учење за идентификацију рањивости у зависностима током сваког спринта, док системи базирани на ВИ оптимизују приоритизацију backlog-а и планирање спринтова [4]. Студије показују да интеграција ВИ у Agile тестирање смањује време потребно за регресионе тестове и повећава покривеност тестирања, што је потврђено у случајевима компанија попут Google и Microsoft које користе ВИ за селекцију релевантних тестова у CI/CD окружењу [15].

Алати ВИ све више подржавају product owner-е и Scrum тимове у доношењу одлука, анализирајући историјске податке о перформансама тимова, брзини испоруке и учесталости дефеката. На основу ових анализа, ВИ може да предвиди оптерећење тима у наредним итерацијама и предложи оптималан број задатака за спринт.

У DevOps делу Agile екосистема, ВИ се користи за аутоматско препознавање аномалија у системским логовима, што омогућава брже откривање инцидената и смањује MTTR (Mean Time To Recovery). Такође, ВИ може препоручити који модули највероватније захтевају рефакторинг, на основу трендова деградације квалитета кода. Ова комбинација предикативне аналитике и аутоматизације чини Agile процесе значајно ефикаснијим, стабилнијим и отпорнијим на ризике који се јављају у динамичним развојним циклусима.

AI у DevOps методологији

DevOps приступ, који комбинује развој и операције, посебно погодује примени ВИ у фазама имплементације и продукције. ВИ се користи за континуирано праћење и детекцију аномалија у реалном времену кроз алате као што су Darktrace, CrowdStrike Falcon и Microsoft Defender for Endpoint, који примењују алгоритме машинског учења за откривање непознатих претњи и zero-day напада [16]. У DevSecOps окружењу, ВИ унапређује статичку (SAST) и динамичку анализу (DAST), као и интерактивно тестирање (IAST), омогућавајући аутоматску валидацију усклађености са стандардима попут GDPR, HIPAA и OWASP [17]. SOAR платформе, попут IBM Resilient и Cortex XSOAR, интегришу ВИ како би аутоматизовале одговор на инциденте, смањујући време реакције и повећавајући ефикасност тимова за безбедност [18]. Реални примери из индустрије показују да ВИ може смањити време имплементације за 30% и побољшати детекцију претњи за 45% у DevOps окружењу [19].

ВИ у DevOps окружењу омогућава и дубљу анализу телеметријских података из контејнерских и клауд окружења, где традиционални системи често не могу да идентификују суптилне индикаторе компромитовања. Модели машинског учења могу препознати необичне обрасце понашања микросервиса, нарушавање дозвољених токова саобраћаја или неправилности у аутентикацији, што омогућава брже изоловање инцидената. ВИ такође подржава аутоматско рангирање аларма, елиминишући велики број лажних позитивних резултата који традиционално оптерећују SOC тимове. Комбинација ових могућности омогућава организацијама да доследно одржавају висок ниво безбедности и стабилности током целокупног CI/CD процеса.

3. Предности и изазови

Примена вештачке интелигенције у безбедносним процесима доноси низ предности које значајно унапређују ефикасност и квалитет заштите софтверских система. Једна од кључних предности је бржа детекција претњи захваљујући алгоритмима машинског учења који анализирају велике количине података и идентификују аномалије у реалном времену [16], [20]. ВИ омогућава смањење лажних позитивних резултата кроз адаптивне моделе који уче из историјских инцидената и контекста, чиме се оптимизује рад тимова за безбедност [14]. Још једна важна предност је аутоматизација одговора на инциденте, коју омогућавају SOAR платформе интегрисане са ВИ, смањујући време реакције и повећавајући отпорност система [15]. Поред тога, ВИ доприноси предикативном планирању опоравка, анализирајући обрасце напада и превиђајући потенцијалне рањивости пре него што дође до компромитовања система [22].

Међутим, интеграција ВИ у ове методологије није без изазова. Недостатак квалитетних података за тренирање модела представља један од највећих проблема, јер неадекватни или пристрасни подаци могу довести до погрешних предикција и одлука [20]. Комплексност интеграције ВИ алата у постојеће процесе развоја и операција захтева додатне ресурсе, обуку и промену организационих структура [12], [14].

Такође, постоји ризик од adversarial ВИ напада, где нападачи манипулишу улазним подацима како би заварали моделе и избегли детекцију [20]. Ови изазови указују на потребу за објашњивом ВИ (Explainable AI), која омогућава транспарентност одлука и повећава поверење у аутоматизоване системе [21-22].

Будући трендови укључују развој генеративних ВИ алата за симулацију напада и креирање сигурносних playbook-а, као и интеграцију ВИ у квантно-отпорну криптографију, што ће додатно унапредити отпорност система на софистициране претње [22]. Очекује се да ће комбинација ових технологија омогућити проактивну сајбер одбрану засновану на анализи великих скупова података и адаптивним механизмима заштите [11], [16].

4. Закључак

Интеграција вештачке интелигенције у методологије развоја софтвера – Waterfall, Agile и DevOps – представља кључну трансформацију у области сајбер безбедности. ВИ не само да унапређује традиционалне приступе, већ уводи проактивне и адаптивне механизме заштите који омогућавају бржу детекцију претњи, аутоматизацију процеса и предикативну аналитику.

У Waterfall окружењу, ВИ доприноси смањењу ризика кроз статичку анализу кода и симулацију напада, док у Agile методологији обезбеђује континуирану верификацију безбедности у итеративним циклусима. DevOps приступ, са нагласком на аутоматизацију и оркестрацију, посебно профитира од примене ВИ кроз real-time мониторинг, детекцију аномалија и аутоматизован одговор на инциденте.

Предности овакве интеграције су јасне: повећана ефикасност, смањење лажних позитивних резултата и већа отпорност система на софистициране нападе. Ипак, изазови попут недостатка квалитетних података, комплексности имплементације и ризика од напада на ВИ моделе захтевају даља истраживања и развој објашњивих и поузданих ВИ решења.

Будућност сајбер безбедности лежи у комбинацији ВИ технологија са напредним криптографским методама и предикативним механизмима одбране, што ће омогућити стварање интелигентних, адаптивних и отпорнијих система.

5. Изјаве захвалности

Истраживања у овом раду су финансирана са пројекта под називом „Унапређење квалитета наставе на судијским програмима Департмана кроз имплементацију резултата научно-истраживачког рада у области Индустријског инжењерства и менаџмента“.

У припреми овог рада су коришћени ChatGPT, Gemini и Copilot.

6. Литература

[1] D. B. J. Rao, P. Kalpana, G. S. N. Kumar, and N. M. Atcha, A Comparative Analysis of Software Development Models: Waterfall, Agile and DevOps, *Intelligent Systems and Sustainable Computing*, Springer, pp. 589–599, 2025.

[2] V. Radovanović et al., Comparison of Agile and DevOps Methodologies: Analysis of Efficiency, Flexibility, and Application in Software Development, *JITA*, vol. 14, pp. 78–83, 2024.

[3] R. Amaro, R. Pereira, and M. M. da Silva, Mapping DevOps capabilities to the software life cycle: A systematic literature review, *Information and Software Technology*, vol. 177, p. 107583, 2025.

[4] M. Gokarna and R. Singh, DevOps: A Historical Review and Future Works, *arXiv preprint*, 2020.

[5] M. E. Misri, The Impact Of DevOps Practices On Software Development Lifecycle, *IJRTI*, 2024.

[6] H. U. Khan et al, AI-driven cybersecurity framework for software development based on the ANN-ISM paradigm, *Scientific Reports*, vol. 15, pp. 1–18, 2025.

[7] A. H. Salem et al, Advancing cybersecurity: a comprehensive review of AI-driven detection techniques, *Journal of Big Data*, vol. 11, Article 105, 2024.

[8] N. Mohamed, Artificial intelligence and machine learning in cybersecurity: a deep dive into state-of-the-art techniques and future paradigms, *Knowledge and Information Systems*, vol. 67, pp. 6969–7055, 2025.

[9] I. Coston et al, Enhancing Secure Software Development with AZTRM-D: An AI-Integrated Approach Combining DevSecOps, Risk Management, and Zero Trust, *Applied Sciences*, vol. 15, no. 15, p. 8163, 2025.

[10] F. Binbeshr and M. Imam, Comparative Analysis of AI-Driven Security Approaches in DevSecOps: Challenges, Solutions, and Future Directions, *arXiv preprint*, Apr. 2025.

[11] F. Binbeshr and M. Imam, Comparative Analysis of AI-Driven Security Approaches in DevSecOps, *arXiv preprint*, 2025.

[12] M. Prakash, *Role of Generative AI Tools in SDLC – Waterfall Model*, MIT Thesis, 2024.

[13] Google, OSS-Fuzz Project, Available: https://google.github.io/oss-fuzz/, ,accessed 20.11.2025.

[14] A. C. Figueiredo, R. Pereira, and M. A. Silva, *Exploring the Integration of AI and DevOps for Agile Product Development*, Springer, 2025.

[15] DigitalDefynd, AI in Software Testing: 5 Case Studies, https://digitaldefynd.com/IQ/ai-in-software-testing-case-studies/, accessed 20.11.2025.

[16] E. Lee, How AI Is Transforming Cybersecurity: Real-World Examples, *TechBullion*, 2025.

[17] T. Abdiukov, Automated Security Testing in DevSecOps Pipelines, *WJARR*, 2024.

[18] IBM, Resilient SOAR Platform, https://www.ibm.com/security/resilient, accessed 20.11.2025.

[19] S. Amgothu and G. Kankanala, AI/ML – DevOps Automation, *AJER*, 2024.

[20] C. Dilmegani, Top 13 AI Cybersecurity Use Cases with Real Examples, *AIMultiple*, 2025.

[21] Stankovski S, EIM'S MESSAGE: Be Ready to Incorporate AI Principles into Education, *Journal of Mechatronics Automation and Identification Technology,* vol. 10, no. 2. pp. E1-E2, 2025.

[22] R. Garvey, The Impact of AI on Waterfall and Agile Methodologies, https://www.linkedin.com/pulse/impact-ai-waterfall-agile-methodologies-pros-cons-ross-garvey-0nlxe/, accessed 20.11.2025.

LOGISTIKA 4.0 U KLINIČKIM ISTRAŽIVANJIMA: IZBOR NAJPOVOLJNIJE TEHNOLOGIJE

LOGISTICS 4.0 IN CLINICAL TRIALS: SELECTING THE BEST TECHNOLOGY

SNEŽANA TADIĆ[1], BOJANA GRAOVAC[2]
MLADEN KRSTIĆ[3], MILOŠ VELJOVIĆ[4]

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/VI25111T

Rezime: Ovaj rad istražuje primenu tehnologija Industrije 4.0 u decentralizovanim kliničkim istraživanjima, sa posebnim fokusom na doprinos efikasnom upravljanju logističkim aktivnostima. Opisan je skup savremenih tehnologija i kriterijumi relevantni za njihovu evaluaciju. Metodološki okvir zasniva se na primeni SWARA (eng. Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) i COBRA (eng. COmprehensive Distance Based RAnking) metode za određivanje težina kriterijuma i rangiranje alternativa. Analiza omogućava sistematično poređenje tehnologija i daje uvid u njihovu operativnu vrednost u savremenim kliničkim istraživanjima.
Ključne reči: decentralizovana klinička istraživanja, logistika 4.0, evaluacija

Abstract: This paper examines the application of Industry 4.0 technologies in decentralized clinical research, with particular focus on contribution to the efficient management of logistics activities. A set of contemporary technologies is presented, along with the criteria relevant for their evaluation. The methodological framework is based on the application of the SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) and COBRA (COmprehensive Distance Based RAnking) methods for determining criterion weights and ranking alternatives. The analysis enables a systematic comparison of technologies and provides insight into their operational value in modern clinical trials.
Key Words: decentralized clinical trials, logistics 4.0, evaluation

[1] Snežana Tadić, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, Beograd, s.tadic @sf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4651-3699
[2] Bojana Graovac, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, Beograd, bojana555graovac@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9874-9374
[3] Mladen Krstić, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, Beograd, m.krstic@sf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-7937-0543
[4] Miloš Veljović, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Vojvode Stepe 305, Beograd, veljovic@sf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-8024-3296

1. Uvod

Savremeni zdravstveni sistemi suočavaju se sa stalnim izazovima sa aspekta efikasnosti, bezbednosti i pristupačnosti. Klinička istraživanja predstavljaju ključni stub u razvoju medicinskih terapija, jer omogućavaju prikupljanje visokokvalitetnih dokaza o njihovoj efikasnosti i bezbednosti [12]. Tradicionalna, odnosno centralizovana klinička istraživanja predstavljaju klasičan model sprovođenja medicinskih studija, u kojem se sve ključne aktivnosti odvijaju na unapred određenim jedinstvenim fizičkim lokacijama, poput bolnica, kliničkih i istraživačkih centara [17]. Decentralizovana klinička istraživanja podrazumevaju da se ove aktivnosti realizuju izvan granica fizičke ustanove, često u domovima učesnika, što direktno podstiče primenu modernih tehnologija [2]. Brojne studije ukazuju na prednosti decentralizovanih kliničkih istraživanja u odnosu na tradicionalne modele, posebno u kontekstu poboljšanja dostupnosti, brzine regrutacije i angažovanosti pacijenata [11, 12, 17]. Literatura ističe da je COVID-19 pandemija dodatno ubrzala usvajanje ovog tipa istraživanja i omogućila razvoj novih digitalnih alata, poput aplikacija za praćenje simptoma, uređaja za merenje vitalnih parametara u kućnim uslovima itd. [18]. Iako postoje istraživanja koja se bave logistikom u zdravstvu [4], farmaciji [16], kliničkim istraživanjima [12], logistika decentralizovih istraživanja se veoma retko istražuje. Mnoge studije su se bavile primenom modernih tehnologija u različitim oblastima logistike [9, 19], kao i u oblasti zdravstva [3], što direktno implicira moguću primenu i u logistici decentralizovanih kliničkih istraživanja.

Tema ovog rada je evaluacija primene tehnologija Logistike 4.0 u decentralizovanim kliničkim istraživanjima. Cilj je pronalazak tehnološkog rešenja koje u najvećoj meri odgovara sveobuhvatno zadatim kriterijumima i čija bi primena imala najpozitivniji uticaj na razvoj ovog tipa kliničkih istraživanja. Nakon uvodnog dela, drugi deo rada daje uvid u tehnologije koje se mogu koristiti u logistici kliničkih istraživanja. Kako bi se izvršilo vrednovanje ovih tehnologija, u trećem delu su dati adekvatni kriterijumi za vrednovanje. Četvrti deo rada prikazuje metodologiju i način korišćenja SWARA (eng. Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) i COBRA (eng. COmprehensive Distance Based RAnking) metode u vrednovanju tehnologija Logistike 4.0 sa aspekta primene u decentralizovanim kliničkim istraživanjima. Na samom kraju je dat zaključak i pravci budućih istraživanja.

2. Tehnologije Logistike 4.0 u decentralizovanim kliničkim istraživanjima

Savremeni razvoj kliničkih istraživanja pokazuje sve izraženiju potrebu za fleksibilnim, digitalno podržanim logističkim rešenjima koja omogućavaju sprovođenje istraživanja izvan tradicionalnih zdravstvenih ustanova. Različita inovativna tehnološka rešenja mogu unaprediti različite delove logističkog sistema – od planiranja i skladištenja do isporuke i kontrole povrata [12]. Logistika 4.0 predstavlja

primenu tehnologija Industrije 4.0 u logističkim aktivnostima, što direktno omogućava ispunjavanje individualnih zahteva korisnika [22] i kao takva, značajna je i za decentralizovana klinička istraživanja. Rešenja koja se mogu primeniti opisana su u nastavku.

Sajber-fizički sistemi (A1) imaju za cilj integraciju fizičkih uređaja i digitalnih kontrolnih sistema radi praćenja i automatizacije procesa u realnom vremenu. Omogućavaju da se parametri transporta ili skladištenja prate i porede sa zadatim normama [21].

Računarstvo u oblaku (A2) omogućava centralizovano čuvanje, razmenu i analizu podataka dostupnih svim učesnicima u istraživanju, a time i skladištenje i obradu podataka prikupljenih iz telemedicinskih sesija, nosivih senzora, elektronskih zdravstvenih zapisa itd. [15].

Big Data (A3) se koristi za obradu velikih količina podataka prikupljenih tokom istraživanja, što omogućava preciznije analize i predviđanja [21]. U fazi regrutacije pacijenata, pomaže u identifikaciji ciljne populacije i predviđanju stope odustajanja učesnika u ispitivanju [10].

Internet stvari (A4) obuhvata mrežu povezanih uređaja koji omogućavaju praćenje isporuka, uzoraka i vitalnih parametara pacijenata, obezbeđuju ispravnost lekova, prate uslove skladištenja i transporta, kako lekova, tako i drugih medicinskih terapija ili uzoraka telesnih tečnosti i krvi [12].

Veštačka inteligencija (A5) se primenjuje za analizu podataka, optimizaciju tokova i predviđanje mogućih problema u logistici. Ova tehnologija ima ulogu u planiranju i predikciji poremećaja u lancu snabdevanja, što je posebno važno kod teško dostupnih lekova ili bioloških materijala koji imaju ograničen rok trajanja [14].

Mašinsko učenje (A6) omogućava sistemima da samostalno uče iz iskustva i unapređuju tačnost predviđanja u planiranju i distribuciji. U radiologiji i patologiji, algoritmi mašinskog učenja postižu rezultate jednake ili bolje od lekara specijalista, posebno u zadacima detekcije anomalija [1].

Roboti (A7) obavljaju automatizovane zadatke u laboratorijama, skladištima ili transportnim procesima, smanjujući rizik od grešaka. Njihova najveća upotreba je vidljiva u isporuci terapija i uzoraka na udaljene lokacije [5]

Proširena stvarnost (A8) se koristi u obuci osoblja, udaljenom nadzoru i upravljanju složenim uređajima u realnom vremenu. Proširena stvarnost omogućava da se pacijenti i istraživači pripreme za ono što ih očekuje tokom sprovođenja studije [6].

Digitalni blizanci (A9) predstavljaju virtuelne modele realnih sistema koji omogućavaju simulaciju i optimizaciju logističkih procesa, pre nego što se oni

realizuju. Omogućavaju da se predvidi reakcija pacijenata na terapiju ili lek, da se optimizuje dizajn kliničkog istraživanja i smanji rizik [20].

Blokčejn tehnologija (A10) obezbeđuje sigurnu razmenu i verifikaciju podataka između učesnika u logistici kliničkih istraživanja. Primena blokčejn tehnologije unapređuje integritet podataka i brzinu njihovog preuzimanja, omogućavajući sigurno deljenje informacija među zainteresovanim stranama [14].

3D štampa (A11) omogućava brzu i prilagođenu izradu medicinske opreme, delova i pakovanja u blizini mesta primene. Pored ovoga, koristi se i u izradi medicinskih pomagala, kao što su slušni aparati, dentalne proteze ili ortopedski ulošci [13].

3. Kriterijumi za evaluaciju tehnologija Logistike 4.0

Odabir kriterijuma zasnovan je na kombinaciji teorijskih saznanja i praktičnih zahteva koji proizilaze iz specifičnosti kliničkih istraživanja.

Brzina implementacije (C1) ima direktan uticaj na dinamiku sprovođenja istraživanja. Uslovi u kojima se studije sprovode često zahtevaju brzu adaptaciju, posebno tokom hitnih istraživanja (npr. u vreme pandemije COVID-19).

Pouzdanost isporuka (C2) meri sposobnost tehnologije da osigura tačnost i kontinuitet u isporukama lekova i medicinskih materijala.

Zaštita i bezbednost podataka (C3) je vrlo bitna jer se u ovim istraživanjima rukuje poverljivim podacima pacijenata.

Uticaj na kvalitet istraživanja (C4) se ogleda u načinu i efikasnosti prikupljanja, obrade i analize podataka koji doprinose naučnoj validnosti i pouzdanosti rezultata.

Skalabilnost (C5) se odnosi na sposobnost tehnologije da podrži širenje obima studije na više lokacija i na veći broj učesnika, što je od suštinske važnosti za globalne kliničke studije.

Otpornost na spoljne rizike (C6) ocenjuje sposobnost tehnologije da održi funkcionalnost u vanrednim situacijama, kao što su prekidi u lancima snabdevanja, regulatorne promene ili sajber napadi.

Jednostavnost primene (C7) se ogleda u intuitivnosti i lakoći upotrebe tehnologija, kako bi se izbegle greške i smanjila potreba za dodatnim obukama.

Troškovi implementacije (C8) predstavljaju ključni faktor u donošenju odluka. Potrebno je razmotriti početne troškove nabavke, integracije i održavanja tehnologije.

Dugoročna isplativost (C9) ocenjuje odnos između investicionih troškova i koristi koje tehnologija donosi tokom vremena.

Smanjenje grešaka u logističkim procesima (C10) se ostvaruje automatizacijom i digitalizacijom, kako bi se smanjile ljudske greške u isporukama, planiranju i praćenju materijala.

Potreba za dodatnim resursima (C11) podrazumeva zahteve za dodatnim osobljem, obukom, hardverom ili softverom da bi tehnologija bila uspešno implementirana.

4. Evaluacija tehnologija Logistike 4.0

Za vrednovanje primene datih tehnologija u decentralizovanim kliničkim istraživanjima prema opisanim kriterijumima biće korišćena kombinacija dve metode višekriterijumskog odlučivanja: SWARA (eng. Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) [7] i COBRA (eng. Comprehensive Distance-Based Ranking) [8].

SWARA metoda će biti korišćena za određivanje relativne važnosti kriterijuma, a COBRA metoda za rangiranje alternativa na osnovu njihovog rastojanja od idealnog rešenja. Zbog obimnosti podataka, biće prikazani samo ulazni i izlazni podaci i deo međurezultata.

Korak 1: Potrebno je poređati kriterijume od najznačajnijeg do najmanje značajnog. U datom slučaju, kriterijumi su poređani na način kao što je prikazano u drugom redu Tabele 1. Kriterijum C3 je najznačajniji, a C11 najmanje značajan.

Korak 2: Počev od drugog kriterijuma u nizu, daju se ocene relativne važnosti svakog kriterijuma u odnosu na prethodni, na skali od 1 do 9.

Korak 3: Na osnovu datih ocena relativne važnosti određuje se koeficijent K_j, koji se računa prema izrazu:

$$K_j = \begin{cases} 1, j=1 \\ Sj+1, j>0 \end{cases} \quad (1)$$

Korak 4: Nakon toga, određuju se prilagođene težine kriterijuma (Q_j):

$$Q_j = \begin{cases} 1, j=1 \\ \frac{Qj-1}{Kj}, j>0 \end{cases} \quad (2)$$

pri čemu je $Q_1 = 1$, zato što prvi kriterijum ima najveći prioritet.

Korak 5: Na kraju se izračunavaju relativne težine kriterijuma (W_j), koje predstavljaju normalizovane vrednosti prilagođenih težina, prema formuli:

$$W_j = \frac{Qj}{\sum_{K=1}^{n} Qk} \quad (3)$$

Na ovaj način se dobijaju proporcionalne težine svih kriterijuma koje odražavaju njihovu relativnu važnost u procesu odlučivanja (tabela 1).

Tabela 1. Primena SWARA metode

Rang kriterijuma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Kriterijumi	C3	C2	C10	C4	C6	C9	C5	C1	C8	C7	C11
S_j	/	2	3	5	4	6	3	7	5	8	9
K_j	1	1.1	1.15	1.25	1.2	1.3	1.15	1.35	1.25	1.4	1.45
Q_j	1	0.90	0.79	0.63	0.52	0.40	0.35	0.26	0.20	0.14	0.10
W_j	0.18	0.17	0.14	0.11	0.09	0.07	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01

Relativne težine kriterijuma dobijene SWARA metodom predstavljaju ulaz za COBRA metodu, čiji koraci primene su prikazani u nastavku.

Korak 1: Formirati matricu odlučivanja A (tabela 2) čiji su elementi a_{ij} ocene alternativa i (i=1,...,n) po kriterijumima j (j=1,...,m):

$$A=\left[\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix}\right] \tag{4}$$

gde je n ukupan broj kriterijuma, a m ukupan broj alternativa koje se uzimaju u razmatranje.

Tabela 2. Matrica odlučivanja

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
A1	3	8	7	8	6	8	3	2	7	8	4
A2	9	7	3	6	9	5	8	7	8	5	8
A3	6	6	4	9	8	6	4	5	9	8	6
A4	8	5	2	6	8	4	6	4	6	5	5
A5	5	8	6	9	7	6	3	3	9	9	6
A6	5	8	6	9	7	6	3	3	9	9	6
A7	2	9	6	4	4	9	2	1	6	9	2
A8	8	5	3	7	7	5	8	5	6	6	7
A9	4	8	6	9	7	8	3	3	9	9	5
A10	1	9	9	5	3	8	1	1	7	5	2
A11	9	6	3	6	6	5	9	7	6	6	8

Korak 2: Formirati normalizovanu matricu odlučivanja Δ na sledeći način:

$$\Delta=[\alpha_{ij}]_{n\times m} \tag{5}$$

$$\alpha_{ij}=\frac{a_{ij}}{\max\limits_{i} a_{ij}} \tag{6}$$

Korak 3: Formirati otežanu normalizovanu matricu odlučivanja Δ_w na sledeći način:

$$\Delta_w=\left[w_j\times\alpha_{ij}\right]_{n\times m} \tag{7}$$

gde je w_j težina kriterijuma j dobijena SWARA metodom.

Korak 4: Za svaku kriterijumsku funkciju odrediti pozitivno idealno (PIS_j), negativno idealno (NIS_j) I prosečno rešenje (AS_j) na sledeći način:

$$\begin{aligned} PIS_j&=\max_i\left(w_j\times\alpha_{ij}\right),\ \forall j=1,\ldots,m \quad za\ \ j\in J^B\\ PIS_j&=\min_i\left(w_j\times\alpha_{ij}\right),\ \forall j=1,\ldots,m \quad za\ \ j\in J^C \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} NIS_j&=\min_i\left(w_j\times\alpha_{ij}\right),\ \forall j=1,\ldots,m \quad za\ \ j\in J^B\\ NIS_j&=\max_i\left(w_j\times\alpha_{ij}\right),\ \forall j=1,\ldots,m \quad za\ \ j\in J^C \end{aligned} \tag{9}$$

$$AS_j=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(w_j\times\alpha_{ij}\right)}{n},\ \forall j=1,\ldots,m \quad za\ \ j\in J^B, J^C \tag{10}$$

gde su J^B i J^C skupovi kriterijuma koristi i troškova, respektivno.

Korak 5: Odrediti rastojanja svake alternative od pozitivnog idealnog ($d(PIS_j)$), negativnog idealnog ($d(NIS_j)$) rešenja kao i pozitivno ($d(AS_j^+)$) i negativno rastojanje ($d(AS_j^-)$) od prosečnog rešenja na sledeći način:

$$d(S_j)=dE(S_j)+\sigma\times dE(S_j)\times dT(S_j),\ \forall j=1,\ldots,m \tag{11}$$

gde S_j predstavlja bilo koje od rastojanja PIS_j, NIS_j, AS_j^+ ili AS_j^-, σ je korektivni koeficijent.

Korektivni koeficijent se računa na sledeći način:

$$\sigma=\max_i dE(S_j)_i-\min_i dE(S_j)_i \tag{12}$$

$dE(S_j)_I$ i $dT(S_j)_I$ označavaju Euklidsko i Taxicab rastojanja, respektivno.

Korak 6: Rangiranje alternativa prema rastućim sveobuhvatnim vrednostima rastojanja (dC_i) koje se dobijaju na sledeći način:

$$dC_i=\frac{d(PIS_j)_i-d(NIS_j)_i-d(AS_j^+)_i+d(AS_j^-)_i}{4},\ \forall 1=1,\ldots,n \tag{13}$$

$$NdC_i=\frac{dC_i+\min_i|dC_i|}{\max_i dC_i-\min_i dC_i},\ \forall 1=1,\ldots,n \tag{14}$$

Dobijeni rezultati (tabela 3) pokazuju da najvišu poziciju zauzimaju digitalni blizanci (A9), što potvrđuje njihov izuzetan značaj u simulaciji realnih procesa I mogućnost da se pomoću njih unapredi planiranje, kontrola i optimizacija sistema, bez potrebe za sprovođenjem eksperimenata u stvarnom okruženju.

Tabela 3. Konačni rezultati i rang alternativa

	Ujednačene vrednosti	Normalizovane vrednosti	Rang
A1	-0.027	0.02722	2
A2	0.023	0.64655	8
A3	0.003	0.39682	7
A4	0.051	1.00000	11
A5	-0.026	0.02941	3
A6	-0.026	0.02941	3
A7	-0.008	0.26700	6
A8	0.034	0.79136	10
A9	-0.029	0.00000	1
A10	-0.022	0.09111	5
A11	0.027	0.70743	9

5. Zaključak

U ovom radu je dat opis i evaluacija primene tehnologija Logistike 4.0 u decentralizovanim kliničkim istraživanjima, sa ciljem da se identifikuje rešenje koje najbolje podržava logističke procese. Pokazano je da digitalni blizanci predstavljaju najpovoljniju tehnologiju, pre svega zbog svoje sposobnosti da simuliraju i optimizuju procese, bez potrebe za intervencijama u realnom okruženju.

Dobijeni rezultati ukazuju da digitalizacija može značajno unaprediti planiranje, praćenje i upravljanje logističkim aktivnostima u decentralizovanim kliničkim istraživanjima. Buduća istraživanja mogu se usmeriti na ispitivanje kombinovanih tehnoloških rešenja Logistike 4.0, kao i na rezultate njihove primene u realnim kliničkim istraživanjima.

6. Literatura

[1] Ahsan M. M, Luna S. A, Siddique Z, Machine-Learning-Based Disease Diagnosis: A Comprehensive Review. *Healthcare*, 10(3), 541, 2022.

[2] Apostolaros M, Babaian D, Corneli A, Forrest A, Hamre G, Hewett J, ... Randall P, Legal, regulatory, and practical issues to consider when adopting decentralized clinical trials: recommendations from the clinical trials transformation initiative. *Therapeutic innovation & regulatory science*, 54(4), 779-787, 2020.

[3] Breazeal C, Social robots for health applications. *Proceedings of the 2011 Annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 5368-5371). IEEE, 2011.

[4] Christopher M.: *Logistics and Supply Chain Management*, 6th edition, The Financial Times, 2022.

[5] Brose S. W, Weber D. J, Salatin B. A, Grindle G. G, Wang H, Vazquez J. J, Cooper R. A, The role of assistive robotics in the lives of persons with disability. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 89(6), 509-521.2010.

[6] Farrell K, MacDougall D, An overview of clinical applications of virtual and augmented reality. *Canadian Journal of Health Technologies*, 3(3), 2023.

[7] Keršuliene V, Zavadskas E. K, Turskis Z, Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management*, 11(2), 243-258. 2010.

[8] Krstić M, Agnusdei G. P, Miglietta P. P, Tadić S, Roso V, Applicability of on Industry 4.0 Technologies in the Reverse Logistics: A Circular Economy Approach Based Comprehensive Distance Based RAnking Method (COBRA) method*, Sustainability*, 14(9), 5632, 2022.

[9] Krstić M, Tadić S, Zečević S, Technological solutions in Logistics 4.0*. Ekonomika preduzeća*, 69(5-6), 385 - 401, 2021.

[10] Jabarulla M. Y, Lee H. N, A Blockchain and Artificial Intelligence-Based, Patient-Centric Healthcare System for Combating the COVID-19 Pandemic: Opportunities and Applications. *Healthcare*, 9(8), 1019. 2021.

[11] Medidata: *Decentralized Clinical Trials: The Future of Clinical Research is Here*, 2022.

[12] Meinert L, *ClinicalTrials: Design, Conduct and Analysis*, 2nd edition, New York, USA, Oxford University Press, 2012.

[13] Musso F, Murmura F, Bravi L, Organizational and Supply Chain Impacts of 3D Printers Implementation in the Medical Sector, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12), 7057, 2022.

[14] Omidian H, Synergizing blockchain and artificial intelligence to enhance healthcare. *Drug Discovery Today*, 29(9), 104111, 2024.

[15] Balakrishnan M, Soam S. K. Cloud Computing Technologies and its Applications in Bioinformatics. *Information and Knowledge Management* (pp. 93-100), 2023.

[16] Rong Y, Yu L, Liu Y, Simic V, Pamucar D, A pharmaceutical cold-chain logistics service quality model using a q-rung orthopair fuzzy framework with distance measure*, Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 136, 2024.

[17] Sehrawat O, Noseworthy P. A, Siontis K. C, Haddad T. C, Halamka J. D, Liu H, Data-Driven and Technology-Enabled Trial Innovations Toward Decentralization of Clinical Trials: Opportunities and Considerations, *Mayo Clinic Proceedings*, 98(9), 1404 - 1421, 2023.

[18] Silva D. J, Nelson B. E, Rodon, J Decentralized Clinical Trials in Early Drug Development - A Framework Proposal. *Journal of Immunotherapy and Precision Oncology*, 7(3), 190-200, 2024.

[19] Tadić S, Veljović M, Krstić M, Zečević S, Application of industry 4.0 technologies in home delivery: A review*, Journal of applied engineering science*, 21(3), 928 - 939, 2023.

[20] Vallée A, Digital twin for healthcare systems, *Frontiers in Digital Health*, vol. 5, 1253050, 2023.

[21] Zhang Y, Qiu M, Tsai C. W, Hassan M. M, Alamri A, Health-CPS: Healthcare cyber-physical system assisted by cloud and big data, *IEEE Systems Journal*, 11(1), 88 - 95, 2015.

[22] Winkelhaus S, Grosse E. H, Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, 58(1), 18-43, 2019.

ДИГИТАЛНИ БЛИЗАНЦИ КАО ПОДРШКА УПРАВЉАЊУ КАНАЛИЗАЦИОНИМ СИСТЕМИМА

DIGITAL TWINS AS ASSET MANAGEMENT SUPPORT FOR URBAN DRAINAGE SYSTEMS

МИЛОШ МИЛАШИНОВИЋ[1], ДАМЈАН ИВЕТИЋ[2]
АЊА РАНЂЕЛОВИЋ[3], РОБЕРТ ЉУБИЧИЋ[4]
ЖЕЉКО ВАСИЛИЋ[5], ОГЊЕН ГОВЕДАРИЦА[6]
ВЕЉКО ПРОДАНОВИЋ[7], ЛУКА ВИНОКИЋ[8]
ЉИЉАНА БРАЈОВИЋ[9], МИЛАН ГОЦИЋ[10]

Оригинални научни рад
DOI: 10.5937/VI25121M

Резиме: Ефикасно управљање канализационим системима постаје све сложеније због застареле инфраструктуре, ограничених ресурса и недостатка кадра. Дигитализација пружа могућност да се овај процес унапреди кроз примену дигиталних близанаца – виртуелних реплика система које омогућавају праћење стања, детекцију проблема у

[1] Милош Милашиновић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, mmilasinovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3296-5224
[2] Дамјан Иветић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, divetic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7475-6108
[3] Ања Ранђеловић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, arandjelovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0804-8928
[4] Роберт Љубичић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, rljubicic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0218-2843
[5] Жељко Василић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, zvasilic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-9574-4509
[6] Огњен Говедарица, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, ogovedarica@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4995-3932
[7] Вељко Продановић, Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије, Фрушкогорска 1, Нови Сад, veljko.prodanovic@ivi.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3800-0765
[8] Лука Винокић, Истраживачко-развојни институт за вештачку интелигенцију Србије, Фрушкогорска 1, Нови Сад, luka.vinokic@ivi.ac.rs, ORCID: 0009-0001-1879-430X
[9] Љиљана Брајовић, Грађевински факултет универзитета у Београду, Булевар краља Александра 73, Београд, brajovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-2265-7308
[10] Милан Гоцић, Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет, Александра Медведева 14, Ниш, milan.gocic@gaf.ni.ac.rs, ORCID: 0000-0001-8398-6570

реалном времену, анализу екстремних сценарија и планирање интервенција. Примена ове технологије као подршке оперативном управљању канализационим системима захтева јасну архитектуру дигиталног близанца. У овом раду представља се концепт оперативног дигиталног близанца зансованог на DATA-INFORMATION-KNOW-LED-GEWISDOM (DIKW) архитектури која се примењује за креирање виртуелне реплике дела канализационог система Новог Београда, која се спроводи у оквиру пројекта DIGIDRAIN.
Кључне речи: дигитализација, DIKW arhitektura, DIGIDRAIN

Abstract: Efficient management of sewer systems is becoming increasingly challenging due to aging infrastructure, limited resources, and workforce shortages. Digitalization offers an opportunity to improve this process using digital twins - virtual replicas of systems that enable condition monitoring, real-time problem detection, extreme scenario analysis, and intervention planning. Implementing this technology as support for operational management of sewer systems requires a clear digital-twin architecture. This paper presents the concept of an operational digital twin based on the DATA–INFORMATION–KNOWLEDGE–WISDOM (DIKW) architecture, applied to create a virtual replica of a section of the Novi Beograd sewer system, developed within the DIGIDRAIN project.
Key Words: digitalization, DIKW architecture, DIGIDRAIN

1. Увод

Канализациони системи представљају један од виталних делова градске инфраструктуре. Управљање оваквим системима постаје све сложеније због унутрашњих фактора као што су застарела инфраструктура, мањак финансија и стручног кадра, а у исто време и због појачаних спољашњих фактора у виду климатких промена које изазивају екстремније сценарије, повећање популације у градовима и непланске урбанизације. Дигитална трансформација, присутна у скоро свим сферама пословања, представља начин за прилазак решавању изазова у управљању канализационим системима. Међу различитим дигиталним технологијама, посебно се издваја потенцијал Дигиталних близанаца (енг. Digital Twins). Дигитални близанци представљају виртуелне реплике стварних система које одликује могућност интеграције података са сензора и конинуално ажурирање реплика. Креирање и употреба динамички ажуриране реплике стварног система може помоћи комуналним предузећима да процене тренутно стање система и доносе оперативне одлуке фокусирајући се на уштеду ресурса и информсиано планирање [1]. Динамика канализационих система и процеси који се одвијају унутар њих захтевају постављање мреже сензора (нпр. IoT мреже) која омогућава увид у стање система на изабраним локацијама. Са друге стране, изазови у прикупљању података и њиховој обради (аномалије у подацима, несдостајући подаци) захтевају употребу мљшинског учења како би се обезбедио континуалан прилив информација из система.

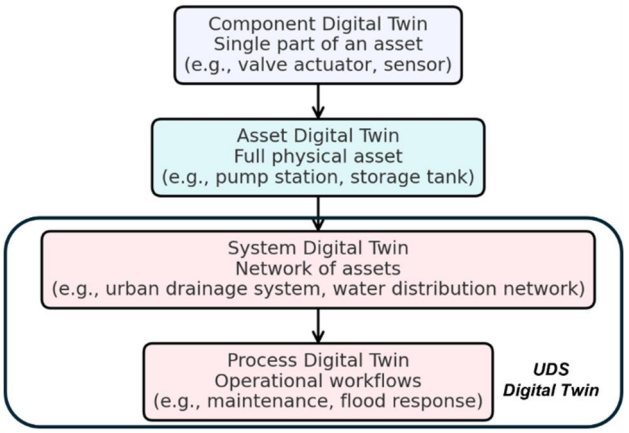
Обрађени подаци се интегришу у симулационе (математичке) моделе којима се добија процена стања целокупног система (изван локација покривених сензорима). Тиме се добија полазна основа за процену ефеката у различитим „шта-ако“ сценаријима, за избор оптималних управљачких процеса као и могућност оптималног планирања поправки и санација у систему [2] – [4].

У овом раду се приказује оквир за креирање интелигентних дигиталних близанаца као подршка управљању градским канализационим системима, са детаљним приказом појединачних корака које је неопходно спровести како би се оваква технологија применила у пракси.

2. Материјали и методе

2.1. Оквир дигиталних близанаца: DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM pipeline

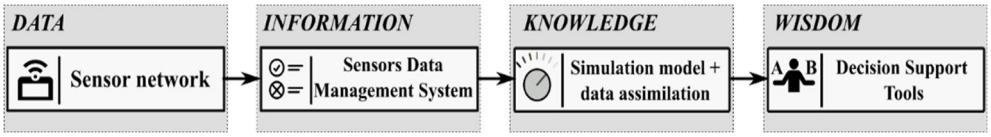
Формирање оперативних дигиталних близанаци за подршку управљању на дневном нивоу зависи од сврхе дигиталног близанца и скале за коју се формира. Начелно, постоји подела дигиталних близанаца [5] на: 1) дигиталне близанце компоненти (енг. component digital twin), 2) дигиталне близанце корисних средстава (eng. asset digital twin), 3) дигиталне близанце система (енг. system digital twin) и 4) дигиталне близанце процеса (енг. process digital twins) (слика 1).



Слика 1. Подела дигиталних близанаца

За дигиталне близанце канализационих система, узимајући у обзир њихову скалу као и сложеност рада, може се рећи да су дигитални близанци система као и процеса, у зависности од нивоа детаљности. Употреба ове технологије за оперативно управљање канализационим системима (детекција цурења воде,

инфилтрације, загушења, илегалних прикључака, оптималног управљања црпним станицама и уставама, предлози плана инспекције и поправки) потребна је јединствена архитектура која омогућава детаљан увид стање система и процесе који се одвијају. У ту сврху, овај рад приказује архитектуру засновану на DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM (DIKW) току информација (слика 2). У наставку је дат детаљнији опис сваке компоненте поменуте архитектуре.



Слика 2. DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-WISDOM архитектура за дигиталне близанце канализационих система

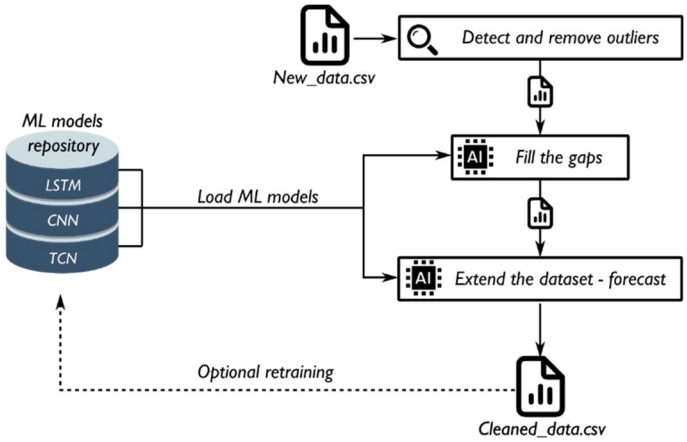
2.2. DATA - Сензори као основа дигиталних близанаца

Основу дигиталних близанаца канализационих система чини мрежа сензора за мониторинг хидрауличких величина (дубина воде у шахтовима, црпним станицама, протоци у цевима). Континуалним праћењем ових величина добија се увид у понашање система за различите спољне покретаче (киша и доток употребљене воде). Сензори који се користе за формирање доготалних близанаца морају да буду прилагођени праћењу динамике релевантних величина, морају да буду оптимално позиционирани у систему, да мерење буде у реалном времену и да омогуће бежични пренос података до одређеног главног чвора [6]. Такође, због скале система који је потребно пратити и неопходне густине, тј. броја, сензора, битан фактор при одабиру сензора је и цена. Због тога, све чешће су у употреби тзв. приступачна (енг. low-cost) решења [7], [8].

2.3. INFORMATION – контрола квалитета података помоћу Вештачке интелигенције

Следећи ниво у DIKW је напредна обрада и употреба података прикупљених података помоћу мреже сензора. Ови подаци често могу бити незадовољавајућег квалитета због непоузданости сензора (неодржавање или физичка оштећења) и због различитих ограничења присутних у хардверској опреми за пренос података. Све то резултира присуством аномалија у подацима (грубе грешке, клизање нуле, „експлозија“ шума) и/или потпуним недостатком података за одређени период (рупе у временским серијама). Такви непоуздани подаци и одсуство података могу угрозити рад дигиталног близанца али и физичког система (нпр. немогућност детекције загушења у мрежи које може довести до изливања воде и плављења). Сложеност динамике канализационог система намеће употребу софистицираних технологија за обраду и даљу

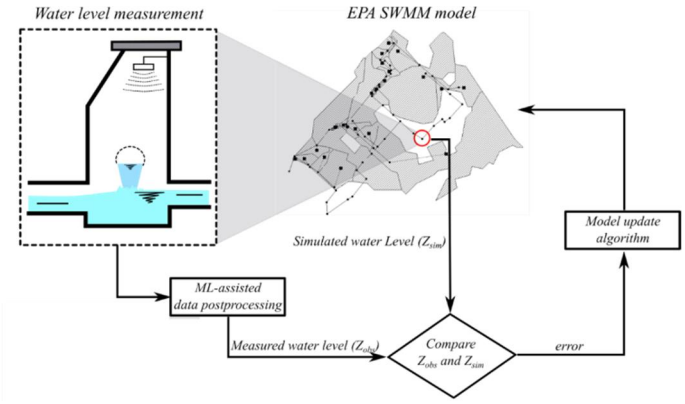
употребу података. DIKW архитектура, предложена у овом раду, трансформише сирове податаке са сензора у корисне информације применом техника машинског учења. Концепт детекције аномалија у подацима и реконструкције недостајућих података заснива се на следећим фазама [7]: 1) хармонизацију података са сензора у облик временских серија, 2) креирање и тренирање скупа предиктивних модела машинског учења за процену података у временским серијама, 3) алгоритма за детекцију аномалија у временским сертијама базираног на скупу модела машинског учења и 4) алгоритма за реконструкцију недостајућих података (слика 3).



Слика 3. Алгоритам за обраду података заснован на машинском учењу

2.4. KNOWLEDGE – интеграција података са сензора и симулационих модела за детекцију стања система

Мрежа сензора и обрађени подаци, иако представљају основу дигиталног близанца, имају просторно ограничење, тј. могу да детектују промене настале на локацијама на којима су распоређени сензор. Са друге стране, промене у систему, које се детектују на сензору, често су последица неких промена на другим локацијама које нису покривене сензорима. Како би се систем за детекцију промене стања даље унапредио и корисне информације са сензора пресликале у стање целог система, неопходан корак у предложеној архитектури дигиталног близанца је формирање симулационог модела који опоноша физички процес у систему. Интеграцијом обрађених података са сензора у симулациони модел, кроз поступак асимилације података, омогућава детаљан увид у стање и система и може помоћи у тачнијој локализацији промена које настају (пуцање цеви и цурење, загушење итд). Овај рад приказује иновативну методу за асимилацију података засновану на теорији управљања (енг. control theory) која омогућава брзу процену стања у целом систему [8] (слика 4).



Слика 4. Схематски приказ алгоритма за интеграцију обрађених података са сензора у симулациони модел

2.5. WISDOM – интелигентно предлагање корака у одржавању и интервенцијама на систему

Финални корак у предложеној DIKW архитектури представља трансформацију свих података који су се односили на хидрауличке величине (и обрађени кроз DATA, INFORMATION и KNOWLEDGE кораке) у практичне препоруке за инспекцију система и евентуалну приоритизацију поправки. Детектовање стања система уз евентуалну локализацију промена у систему омогућава полазну основу (последње, тренутно стање система) над којом се могу анализирати различити сценарији (нпр. утицај различитих кишних сценарија) који може допринети одлуци шта се прво у систему поправља. Такође, процена стања система омогућава адаптирање контролних правила (за управљање пумпама) и потенцијалну оптимизацију у циљу уштеде потрошње енергије.

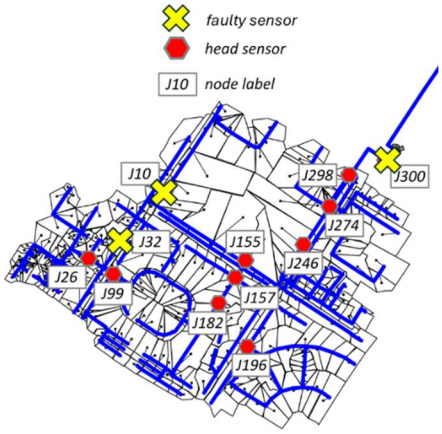
2.6. DIGIDRAIN – пилот пројекат

Претходно описана архитектура иза дигиталног близанца за канализационе системе развија се у оквиру пројекта чији је акроним DIGIDRAIN (пун назив: City-scale Digital Twins for Urban Drainage Systems). У оквиру овог пројекта развија се дигитални близанац за део канализационог система Новог Београда (слика 5). Поставља се мрежа сензора дубине у хатовима мреже као и мерило протока на потисном делу система (низводно од црпне станице Блок 13). Циљ пројекта је да на овој демо локацији: 1) испита поузданост приступачних сензора као допунске мреже за мониторинг система, 2) развије напредни систем за управљање подацима који пристижу са сензора применом вештачке интелигенције, 3) развије алгоритам за ефиксану интеграцију података у математички модел и 4) развије алгоритам за детекцију промена у систему и систем за информисање оператера.

Слика 5. Локација дела система атмосферске канализације на Новом Београду за коју се развија дигитални близанац, са макро положајем сензора

3. Резултати и дискусија

Како би се демонстрирао потенцијал предложене методологије дигиталног близанца за канализационе системе, приказује се значај алгоритама описаних под INFORMATION и KNOWLEDGE деловима предложене архитектуре. Алгоритам за детекцију аномалија и реконструкцију података са сензора приказан је за хипотетички сценарио у коме долази до квара на 3 од 12 сензора (3 сензора је без података) у временском периоду од 5 дана (слика 6).

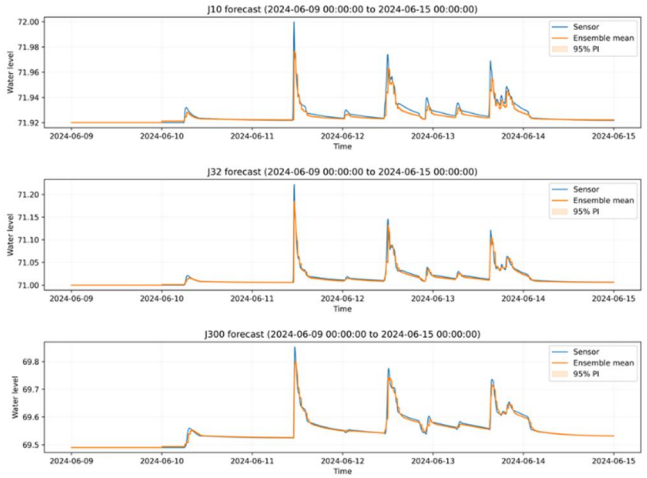


Слика 6. Локација дела система атмосферске канализације на Новом Београду за коју се развија дигитални близанац, са макро положајем сензора

Применом алгоритма који се заснива на скупу модела машинског учења могуће је у значајној мери реконструисати недостајуће податке (табела 1, слика 7).

Табела 1. Индикатори квалитета реконструкције података на локацијама покварених сензора

	RMSE	MAE	MAPE	R2
J10_head	0.003	0.001	0.002	0.843
J26_head	0.006	0.001	0.002	0.921
J300_head	0.008	0.004	0.005	0.974



Слика 7. Рконструисане временске серије на локацијама покварених сензора

4. Закључци и будући правци

Концепт вишенаменског дигиталног близанца за канализационе системе и предложена DIKW архитектура, развијена у оквиру пројекта DIGIDRAIN, илуструје како модерне дигиталне технологије могу фундаментално преобликовати начин на који се управља градском инфраструктуром. Праћењем понашања система у реалном времену путем сензора, робусним платформама за управљање подацима, напредним симулационим моделима и алгоритмима за асимилацију података, дигитални близанац постаје динамичан, живи систем, а не статички приказ.

Слојевита архитектура описана у овом раду показује да свака компонента има посебну улогу, а њихова права вредност се појављује када су међусобно повезани. Мрежа сензора оживљава систем, управљање подацима обезбеђује поузданост, модели проширују способност предвиђања, а алгоритми асимилације осигуравају усклађивање са стварношћу. Заједно, они чине основу система подршке одлучивању који претвара сирове податке у стварне увиде.

Предности дигиталних близанаца за оператере канализационих система су: рано откривање аномалија као што су инфилтрација, ексфилтрација или загушења; побољшани краткорочне прогнозе, као и побољшано одређивање приоритета у одржавању система.

Такође, у условима мањка квалификованог радног кадра за послове при управљању канализационим системима, повезивање дигиталних близанаца и агената вештачке интелигенције (eng. AI agents) представља неопходна наредни корак у аутоматизацији рада градских комуналних система.

5. Захвалница

Пројекат City-scale Digital Twins for Urban Drainage Systems: bringing „smart“ to water infrastructure (Акроним пројекта: DIGIDRAIN) финансира се од стране Фонда за науку Републике Србије у оквиру Програма подршке сарадњи са српском научном дијаспором – Заједнички истраживачки пројекти (ДИЈАСПОРА 2023), уговор бр. 17823 . Такође, овај пројекат је подржан од стране ЈКП Београдски водовод и канализација.

6. Литература

[1] Милашиновић М, Иветић Д, Ранђеловић А, Љубичић Р, Василић Ж, Говедарица О, Продановић В, Винокић Л, Брајовић Љ., Гоцић М, Дигитални близанци: корак напред у дигитализацији водоводних и канализационих система, *Вода и санитарна техника*, Удружење за технологију воде и санитарно инжењерство, 2025.

[2] Bartos M, Kerkez B, Pipedream: An Interactive Digital Twin Model for Natural and Urban Drainage Systems, *Environmental modelling and software*, 2021.

[3] Pedersen A. N, Borup M, Brink-Kjær A, Christiansen L, Mikkelsen P. S, Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors*, Water* (Switzerland) 13(5), 2021.

[4] Kim Y, Jeil O. and Bartos M, Stormwater Digital Twin with Online Quality Control Detects Urban Flood Hazards under Uncertainty, *Sustainable Cities and Society*, 118., 2025

[5] Kienzler R, Digital Twins and the Internet of Things: How to throw AI models at vast amount of historic and real-time IoT data, *IBM Developer Article*, 2024.

[6] Ivetić D, Ljubičić R, Lakičević J, Brajović Lj, Milašinović M, Senzori kao deo digitalnih blizanaca kanalizacionih sistema: specifičnosti mernih metoda i mogućnosti primene pristupačnih rešenja, *LXVIII Konferencija ETRAN*, Čačak, 9-12. jun 2025.

[7] Vinokić L, Milašinović M, Vasilić Ž, Ivetić D, Stojković M, Prodanović V, Digital Twins of Urban Drainage Systems: ML-assisted algorithm for processing sensor

data. In: *13th Urban Drainage Modelling Conference - UDM 2025*, Innsbruck, Austria, September 2025.

[8] Milašinović M, Vasilić Ž, Ivetić D, Digital Twins of Urban Drainage Systems: innovative data assimilation algorithm for continuous state update. In: *13th Urban Drainage Modelling Conference - UDM 2025*, Innsbruck, Austria, September 2025.

ОРГАНИЗАТОРИ

СИТС - САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ
ИСТОРИЈАТ И САДРЖАЈ РАДА

ИСТОРИЈАТ

Корени српске техничке цивилизације почињу још у доба Немањића. Зачеци инжењерства су у рударско-металуршким подухватима (Ново брдо) и грађењу величанствених сакралних објеката средњевековне српске државе.

Од Првог (1804), а посебно Другог српског устанка (1815), оживљава српско градитељство које је нарочито од тридесетих година било везано за изградњу саобраћајница, подизање јавних објеката, уређење вароши, и др.

У то време (1834/35. године) из аустријског царства долазе и први државни службеници – "правителствени инџинири" (Франц Јанке и барон Франц Кордон), а у том веку Србијом је прошло око 600 инжењера.

Започињање наставе на Техничком факултету Велике школе 1863. године значило је прекретницу у школовању српских инжењера. Поред школовања у земљи један број инжењера се школовао и у иностранству.

Истовремено са школовањем првих техничких кадрова јавља се и иницијатива за оснивањем стручне, еснафске организације. Тако већ 3. фебруара 1868. године, само годину дана после предаје кључева града Београда од стране турског паше кнезу Михајлу, долази до оснивања „Техничрске дружине", чији је први председник био Емилијан Јосимовић и тај датум је усвојен као година настанка наше организације. Убрзо затим (1869) оснива се и Удружење за пољску привреду, односно Српско пољопривредно друштво.

Године 1890. долази до оснивања Удружења српских инжењера, а од 1896. инжењера и архитеката.

Прво стручно гласило овог Удружења „Српски технички лист“ изашао је 1890. године.

Први почасни члан Удружења српских инжењера био је Никола Тесла, који је то признање добио за време свог кратког и јединог боравка у Београду 1892. године.

За време Првог светског рата у Солуну излазе два броја „Српског техничког листа” где се иначе налазио велики број инжењера који су били и војници. Ту је 1918. године одржана Скупштина са 463 инжењера.

Удружење је 1932/35. године сопственим средствима, кредитима и добровољним прилозима изградило свој дом у улици Кнеза Милоша 7, а Дом инжењера „Никола Тесла“ ул. Кнеза Милоша 9-11, изграђен је у периоду од 1962. до 1969. године. У ова два дома инжењера смештен је и ради Савез инжењера и техничара Србије са својих 26 републичких струковних и мултидисциплинарних друштава, који се самостално финансирају, од укупно 45 чланица Савеза.

Поред **Емијилана Јосимовића**, првог председника, који је био и ректор Лицеја и Велике школе и почасни члан Српске краљевске академије у раду нашег Савеза учествовали су и дали свој допринос и: **Коста Алковић**, проф. Велике школе, министар грађевина, члан Српског ученог друштва и Српске краљевске академије, **Димитрије Стојановић**, професор Техничког факултета и први директор Српских државних железница, члан Српског ученог друштва и Српске краљевске академије, **Милош Савчић**, министар грађевине Србије, председник града Београда, и познати привредник, који је дао највише средстава 1932. године за подизање Дома инжењера Србије, председници САНУ **Јосиф Панчић** и **Јован Жујовић**, **Симо Лозанић, Кирило Савић, Александар Деспић, Никола Хајдин** и многи други познати стручњаци и научни радници.

САДРЖАЈ РАДА

Савез инжењера и техничара Србије је добровољна, невладина, непрофитна, стручно-научна, интересна, професионална и ванстраначка организација инжењера и техничара и њихових организација у Републици Србији, отворена за сарадњу са другим научно-стручним, привредним и осталим организацијама, на бази међусобног уважавања, узајамног поштовања и самосталности у раду.

Савез инжењера и техничара Србије и његове чланице се самостално финансирају и сасостално финансирају своје стручне активности и издавање стручних публикација.

Циљеви и задаци СИТС-а су:

- окупљање и организовање инжењера и техничара Србије ради остваривања њихових интереса, увећања стручног знања, обезбеђења одговарајућег статуса у заједници, на бази њиховог стручног доприноса у привредном, економском, научно-технолошком и укупном развоју Републике Србије;

- обједињавање, јачање и омасовљавање инжењерско-техничарских организа-ција Србије, развијање међусобне сарадње и сарадње са одговарајућим међународним организацијама инжењера и техничара;
- побољшавање статуса, интереса, угледа и заштите чланова инжењерскотех-ничарске организације Србије и пружање помоћи својим члановима и чланицама;
- развијање свих облика сарадње са другим домаћим и иностраним инжењерским организацијама и асоцијацијама
- пружање помоћи инжењерима и техничарима у научном и стручном усавршавању и организовању одговарајућих облика перманентног образовања;
- праћење савременог развоја технике и технологије и указивање на токове збивања и промене у овој области и давање мишљења о оптималности техничких и технолошких решења при привредним, инвестиционим и другим подухватима;
- неговање и развијање етике инжењерско-техничарског позива, људских права и слобода;
- подстицање, организовање научно-стручних скупова, објављивање научних и стручних радова, издавање часописа и других публикација од интереса за инжењерско-техничарску организацију и техничку интелигенцију;
- организовање конгреса од значаја за струку, који је скуп инжењера и техничара Србије, на коме се разматрају најзначајнија питања из делокруга рада инже-њерско-техничарске организације Србије, развоја привреде, науке, технике и образовања. Конгрес се одржава у складу са могућностима и потребама, о чему одлуку доноси Скупштина СИТС;
- организовање скупова, семинара, курсева, стручних обилазака, изложби, округлих столова и јавних расправа од интереса за локалне самоуправе и за привредне, образовне и здравствене институције;
- организовање континуалне едукације за инжењерске, здравствене и образовне организације у сарадњи и у складу са критеријумима меродавних државних и других институција;
- рад на техничкој регулативи (законима, прописима и стандардима), обезбеђујући њену савременост, адекватност, актуелност и функционалност, а посебно на осавремењавању регулативе за локалне самоуправе;
- разматрање и давање стручних мишљења о програмима, плановима, пројектима, анализама и другим актима важним за развој технике, технологије и производње у Републици Србији, као и судско вештачење;
- организација и одржавање стручних испита у складу са Законом;
- подстицање и помагање оних активности и иницијатива усмерених ка очувању животне средине, водних ресурса и уређењу простора, уштеди и рационализацији потрошње свих врста енергије;
- сарадња са одговарајућим стручним, привредним и другим организацијама и органима на реализацији задатака од заједничког интереса;
- неговање сећања на значајне личности и догађаје из историје инжењерско-техничарских струка, науке и дисциплина;

- управљање Домовима и осталом имовином, извршавање општих, административних, стручних, рачуноводствено-финансијских, техничких и других послова преко Стручне службе Савеза инжењера и техничара Србије у свом интересу, интересу чланова, чланица, запослених и друго.

Савез и чланице Савеза имају развијену сарадњу са органима локалне самоуправе, одговарајућим градским и републичким министарствима и другим органима, Српском академијом наука и уметности, Инжењерском комором Србије, Инжењерском академијом Србије, Привредном комором Србије, са многим предузећима, привредним и стручним асоцијацијама, факултетима и универзитетима и многим другим институцијама. Имамо развијену и одговарајућу међународну сарадњу.

Савез већ дуги низ година на основу Закона и уговора са надлежним републичким министарствима организује и спроводи послове одржавања стручних испита из области инжењерских струка у Републици Србији.

Савез инжењера и техничара Србије – СИТС, данас има више хиљада својих чланова, 45 својих чланица у Србији, и то: 27 чланица на републичком нивоу, струковних савеза различитих инжењерских струка, (архитектура, урбанизам, грађевина, машинство, електротехника, рударство, геологија, геодезија, агрономија, шумарство, хемија и др.), 18 колективних чланице савеза на покрајинском, градском и регионалном нивоу.

Савез је оснивач ИАС – Инжењерске академије Србије. У оквиру Савеза формиран је у 2002. години Развојни центар СИТС-а који ангажује наше научнике и стручњаке на решавању многих текућих и развојних садржаја из области привреде Србије.

Поред бројних периодичних публикација, редовно излази више стручних часописа, међу којима: „Техника“, „КГХ“ (Климатизација, грејање, хлађење), „Изградња“, „Процесна техника“, „Пољопривреда“, „Шумарство“, „Текстилна индустрија“, Ecologica“, „Заштита материјала“ и други.

Савез има своју покретну и непокретну имовину (Домове инжењера у Београду), самостално се финансира, редовно измирује своје обавезе према свим надлежним државним органима и својим добављачима и успешно послује.

Савез инжењера и техничара Србије, као национална инжењерска организација Србије, члан је међународних организација, и то ENGINEERS EUROPE – Европске инжењерске федерације која окупља националне инжењерске асоцијације из 33 земље Европског високобразовног подручја и COPISSE – Стална конференција инжењера Југоисточне Европе.

Корени су давно постављени и евидентни су резултати прећашњег рада. Налазећи инспирацију у прошлим временима сагласно многим и великим променама у свету, а посебно у техници и технологији, Савеза инжењера и техничара Србије и његове чланице у континуитету иновирају свој рад, од интереса за своје чланове, своје чланице, грађане и државу Србију.

ИНЖЕЊЕРСКА АКАДЕМИЈА СРБИЈЕ

Инжењерска академија Србије - ИАС основана је 26.06.2000. године ради остваривања циљева и задатака из техничко-технолошких делатности, развоја и унапређења инжењерске струке, примене савремених техничко-технолошких знања, унапређења стандарда и садржаја у науци, образовању, привреди, заштити животне средине и другим привредним сферама живота и рада.

Идеја оснивања Инжењерске академије била је присутна у круговима Савеза инжењера и техничара Југославије - СИТЈ још од 1993. године, када је у Статут СИТЈ унета одредба о оснивању Академије. На осмом Конгресу СИТЈ, септембра 1997. године, предлог за оснивање Инжењерске академије добио је пуну подршку.

Активни оснивачи Инжењерске академије Србије - ИАС су:

- Савез инжењера и техничара Србије - СИТС
- Друштво за путеве Србије.

М И С И Ј А

Мисија ИАС је да буде креативна и иновативна научно-стручна организација која ће подржати изврсност у области инжењерског и научног стваралаштва и допринети развоју техничких наука и преносу знања оријентисаних на економски и привредни развој Србије, као и укупни развој друштва у целини, уз промовисање одрживог развоја, заштите животне средине и људи и безбедну употребу технологија.

В И З И Ј А

Визија ИАС је да у наредних десет година постане високо респектабилна научно-стручна инжењерска организација у функцији унапређења привредног, друштвеног и економског амбијента Републике Србије.

С И С Т Е М В Р Е Д Н О С Т И

Систем вредности ИАС заснива се на промовисању професионализма, академског понашања и поштвања високих етичких норми.

СУОРГАНИЗАТОРИ

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

Факултет техничких наука, основан 1960. године, једна је од најсавременије организованих високообразовних институција у региону. Факултет је данас научно-образовна институција састављена од 13 департмана, 15 стручних служби и 38 научно-стручног центра. Лоциран је у неколико зграда и располаже са преко 35.000 м2. Има око 1.200 запослених и око 16.000 студената. Факултет техничких наука изводи наставу на свим нивоима академских и струковних студија из следећих области високог образовања:

1. Машинско инжењерство
2. Електротехничко и рачунарско инжењерство
3. Грађевинско инжењерство
4. Саобраћајно инжењерство
5. Архитектура
6. Индустријско инжењерство и инжењерски менаџмент
7. Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду
8. Геодетско инжењерство

Интердисциплинарне студије:

1. Графичко инжењерство и дизајн
2. Мехатроника
3. Управљање ризиком од катастрофалних догађаја и пожара
4. Примењена математика
5. Рачунарска графика
6. Сценски дизајн
7. Биомедицинско инжењерство
8. Техничка механика
9. Енергетске технологије
10. Урбанизам и регионални развој
11. Третман и заштита вода
12. Инжењерство информационих система
13. Информациони инжењеринг

The Faculty of Technical Sciences, which was established in 1960, is one of the best organized high-educational institutions in the region. Today, Faculty of Technical Sciences is scientific and educational institutions of 13 institutes/departments, 15 administrative sectors and 38 scientific technical centers. The Faculty is located within the University campus in several separate buildings of 35.000 m2 in area, with about 1.200 employed personal and about 16.000 students. The Faculty of Technical Sciences offers the following profiles of high education:

1. Mechanical engineering
2. Electrical engineering and computing
3. Civil engineering
4. Traffic engineering
5. Architecture
6. Industrial engineering and engineering management
7. Environmental engineering and occupational safety engineering
8. Geodesy

Interdisciplinary studies:

1. Graphic engineering and design
2. Mechatronics
3. Disaster Risk Management and Fire Safety
4. Applied mathematics
5. Computer graphics
6. Scene design
7. Biomedical engineering
8. Technical Mechanics
9. Energy technologies
10. Urban planning and regional development
11. Watertreatment and protection engineering
12. Information Systems Engineering
13. Information Engineering

ВИСОКО МЕСТО У ДРУШТВУ НАЈБОЉИХ

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад
021/6350-413, 021/485-2222

HIGH PLACE IN TOP SOCIETY

Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad
021/6350-413, 021/485-2222

www.ftn.uns.ac.rs

Универзитет у Новом Саду
Технички факултет “Михајло Пупин”
Зрењанин, Ђуре Ђаковића бб
www.tfzr.uns.ac.rs
Телефон: 023/550-515
dekanat@tfzr.rs

Технички факултет “Михајло Пупин” Зрењанин, као чланица Универзитета у Новом Саду, основан је 1974. године. Основна делатност Факултета јесте образовање студената за различите инжењерске профиле.

Дипломирани студенти Факултета су дали и дају велики подстицај привредном развоју града Зрењанина, Баната, али и других средина, а неки од њих су успешни на бројним универзитетима и у бројним компанијама широм света. Захваљујући преданом раду запослених наставника и сарадника, али и студената, Технички факултет “Михајло Пупин” Зрењанин има изражен допринос развоју и позиционирању Универзитета у Новом Саду на листама успешних универзитета у свету.

Данас се на Факултету реализују акредитовани студијски програми на сва три нивоа академских студија, који у потпуности одговарају изазовима савременог привредног и друштвеног окружења.

Основне академске студије:
- Информационе технологије
- Информационе технологије - софтверско инжењерство
- Машинско инжењерство
- Инжењерски менаџмент
- Одевно инжењерство
- Инжењерство заштите животне средине
- Индустријско инжењерство у експлоатацији нафте и гаса

Мастер академске студије:
- Информационе технологије
- Информатика, техника и технологија у образовању
- Машинско инжењерство
- Инжењерски менаџмент
- Одевно инжењерство
- Индустријско инжењерство у експлоатацији нафте и гаса

Докторске академске студије:
- Информационе технологије
- Инжењерски менаџмент

ITNMS

INSTITUT ZA TEHNOLOGIJU NUKLEARNIH I DRUGIH MINERALNIH SIROVINA

B E O G R A D

ITNMS se bavi fundamentalnim, primenjenim i razvojnim istraživanjima do kompletnih tehničko-tehnoloških rešenja i razvojem i proizvodnjom novih materijala u domenu:

- **tehnologija za pripremu i koncentraciju metaličnih, nemetaličnih i energetskih sirovina,**
- **metalurških tehnologija,**
- **neorganske hemijske tehnologije,**
- **hemijske, elektrohemijske i mehanohemijske sinteze,**
- **hemijskog inženjerstva,**
- **zaštite i očuvanja životne sredine,**
- **hemijska, fizička, fizičko-hemijska, mineraloška ispitivanja,**
- **eksperimentalne proizvodnje, i uvođenja novih tehničko-tehnoloških rešenja u industriju.**

Bulevar Franša d'Eperea 86, 11000 Beograd, 390, . (011) 369-17-22,

. (011) 369-15-83

http://www.itnms.ac.rs - E-mail: itnms@itnms.ac.rs

ISBN-978-86-82563-31-0