

VEŠTAČKA INTELIGENCIJA U PREDIKCIJI EMISIJA I EKOLOŠKIH INCIDENATA U IPPC POSTROJENJIMA: RUDNIK BOR KAO STUDIJA SLUČAJA

Aleksandra Gajović

Naučno i stručno društvo za upravljanje rizicima od katastrofa, Međunarodni institut za istraživanje katastrofa, ProSafeNet, globalni centar za profesionalce i istraživače u oblasti bezbednosti, sigurnosti, rizika i upravljanja vanrednim situacijama, Beograd, Srbija; e-pošta: aleksandra.gajovic@gmail.com

Vladimir M. Cvetković

Fakultet za bezbednost, Univerzitet u Beogradu, Katedra za upravljanje katastrofama i bezbednost životne sredine, Naučno i stručno društvo za upravljanje rizicima od katastrofa, Naučno i stručno društvo za upravljanje rizicima od katastrofa, Međunarodni institut za istraživanje katastrofa, ProSafeNet, globalni centar za profesionalce i istraživače u oblasti bezbednosti, sigurnosti, rizika i upravljanja vanrednim situacijama, Beograd, Srbija; Bezbednost i studije katastrofa, Katedra za tehnologiju termičke obrade, Katedra za inženjerstvo životne sredine i energetskih procesa, Montanuniverzitet Leoben, Leoben, Austrija; e-pošta: vmc@fb.bg.ac.rs; vladimir.cvetkovic@unileoben.ac.at

Dalibor Milenković

Naučno i stručno društvo za upravljanje rizicima od katastrofa, Međunarodni institut za istraživanje katastrofa, ProSafeNet, globalni centar za profesionalce i istraživače u oblasti bezbednosti, sigurnosti, rizika i upravljanja vanrednim situacijama, Beograd, Srbija, zemlja; e-pošta: milenkovic.dalibor82@gmail.com

Apstrakt: Rudarski kompleks Bor predstavlja jedno od najznačajnijih industrijskih postrojenja u Srbiji, koje karakteriše dugogodišnja intenzivna rudarsko-metalurška aktivnost i značajan uticaj na lokalni kvalitet vazduha i bezbednost životne sredine. Kao IPPC postrojenje, ovaj kompleks podleže strogim regulatornim zahtevima u vezi sa integrisanom

prevencijom i kontrolom zagađenja, kontinuiranim monitoringom emisija i upravljanjem rizicima. Međutim, tradicionalni sistemi monitoringa emisija sumpor-dioksida (SO₂), suspendovanih čestica (PM10 i PM2.5) i teških metala — koji se uglavnom zasnivaju na reaktivnom merenju i izveštavanju nakon nastanka incidenta — pokazali su ograničenu efikasnost u sprečavanju ekoloških incidenata i ponovljenih prekoračenja propisanih graničnih vrednosti. Učestale epizode povišenog zagađenja ukazuju na potrebu za naprednijim, prediktivnim i preventivnim pristupima upravljanju životnom sredinom. Ovaj rad ispituje ulogu digitalnih tehnologija i veštačke inteligencije (AI) u unapređenju predikcije emisija i ranog otkrivanja ekoloških incidenata u IPPC postrojenjima, pri čemu je rudarski kompleks Bor analiziran kao reprezentativna studija slučaja. Istraživanje se zasniva na analizi javno dostupnih skupova podataka dobijenih iz državnih sistema monitoringa životne sredine, univerzitetskih mernih serija i real-time platformi za praćenje indeksa kvaliteta vazduha (AQI). Ovi podaci obezbeđuju dugoročne i visokofrekventne vremenske serije pogodne za naprednu analitičku obradu. U radu se razmatra primena AI metoda, uključujući analizu vremenskih serija i prediktivne algoritme kao što su neuronske mreže tipa Long Short-Term Memory (LSTM), u cilju prognoziranja trendova emisija i identifikovanja uslova koji mogu dovesti do ekoloških incidenata. Rezultati ukazuju da AI-podržani modeli mogu značajno unaprediti kapacitete za rano upozoravanje, procenu rizika i podršku odlučivanju, omogućavajući prelazak sa reaktivne usklađenosti ka proaktivnoj zaštiti životne sredine. Pored kontrole emisija, predloženi pristup doprinosi unapređenju ekološke bezbednosti, zaštiti javnog zdravlja i povećanju transparentnosti u primeni IPPC regulative. Na osnovu dobijenih nalaza, rad predlaže integrisani okvir pametnog ekološkog monitoringa koji kombinuje kontinuirano digitalno praćenje sa AI-zasnovanom prediktivnom analitikom. Ovaj okvir može poslužiti kao referentni model za druga visokorizična industrijska postrojenja u Srbiji i širem regionu, podržavajući efikasniju primenu IPPC zahteva i jačanje veze između ekološke regulative, tehnoloških inovacija i smanjenja rizika od katastrofa.

Ključne reči: Rudarski kompleks Bor, veštačka inteligencija, IPPC postrojenje, AQI, LSTM

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PREDICTING EMISSIONS AND ENVIRONMENTAL INCIDENTS IN IPPC INSTALLATIONS: THE BOR MINE AS A CASE STUDY

Aleksandra Gajović

Scientific and Professional Society for Disaster Risk Management, International
Institute for Disaster Research, ProSafeNet, a Global Hub for Professionals and
Researchers in Safety, Security, Risk, and Emergency Management, Belgrade, Serbia,
Country; e-mail: aleksandra.gajovicc@gmail.com

Vladimir M. Cvetković

Faculty of Security Studies, University of Belgrade, Department of Disaster
Management and Environmental Security, Scientific and Professional Society for
Disaster Risk Management, Scientific and Professional Society for Disaster Risk
Management, International Institute for Disaster Research, ProSafeNet, a Global
Hub for Professionals and Researchers in Safety, Security, Risk, and Emergency
Management, Belgrade, Serbia; Security and Disaster Studies, Chair of Thermal
Processing Technology, Department of Environmental and Energy Process
Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria;
e-mail: vmc@fb.bg.ac.rs;vladimir.cvetkovic@unileoben.ac.at

Dalibor Milenković

Scientific and Professional Society for Disaster Risk Management, International
Institute for Disaster Research, ProSafeNet, a Global Hub for Professionals and
Researchers in Safety, Security, Risk, and Emergency Management, Belgrade, Serbia,
Country; e-mail: milenkovic.dalibor82@gmail.com

Abstract: *The Bor mining complex represents one of the most significant industrial installations in Serbia, characterized by a long history of intensive metallurgical and mining activities and a substantial impact on local air quality and environmental safety. As an IPPC installation, the complex is subject to strict regulatory requirements related to integrated*

pollution prevention, continuous emission monitoring, and risk management. However, traditional monitoring systems for sulfur dioxide (SO₂), particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), and heavy metal emissions—primarily based on reactive measurement and post-incident reporting—have demonstrated limited effectiveness in preventing environmental incidents and recurring exceedances of regulatory standards. Frequent episodes of elevated pollution levels indicate the need for more advanced, predictive, and preventive approaches to environmental management. This paper examines the role of digital technologies and artificial intelligence (AI) in enhancing emission prediction and early detection of environmental incidents within IPPC installations, with the Bor mining complex serving as a representative case study. The research is based on the analysis of publicly available datasets obtained from governmental environmental monitoring systems, university-based measurement series, and real-time air quality index (AQI) monitoring platforms. These datasets provide long-term and high-frequency time-series data suitable for advanced analytical processing. The study explores the application of AI-based methods, including time-series analysis and predictive algorithms such as Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks, for forecasting emission trends and identifying conditions that may lead to environmental incidents. The results indicate that AI-supported models can significantly improve the capacity for early warning, risk assessment, and decision support, thereby enabling a transition from reactive compliance toward proactive environmental protection. In addition to emission control, the proposed approach contributes to improved environmental safety, protection of public health, and increased transparency of IPPC compliance. Based on the findings, the paper proposes an integrated smart environmental monitoring framework that combines continuous digital monitoring with AI-driven predictive analytics. This framework may serve as a reference model for other high-risk industrial installations in Serbia and the wider region, supporting more effective implementation of IPPC requirements and strengthening the link between environmental regulation, technological innovation, and disaster risk reduction.

Keywords: Bor mining complex, artificial intelligence, IPPC plant, AQI, LSTM

1. UVOD

1.1. IPPC kao regulatorni okvir

Integrisano sprečavanje i kontrola zagađenja (IPPC) predstavlja ključni regulatorni okvir u oblasti zaštite životne sredine koji je uspostavljen sa ciljem da se emisije zagađujućih materija iz industrijskih postrojenja minimiziraju kroz holistički pristup. Ovaj sistem reguliše industrijske aktivnosti koje potencijalno mogu značajno uticati na vazduh, vodu i zemljište, čime se doprinosi opštem cilju visokog nivoa zaštite životne sredine i zdravlja ljudi (Otvorena Vlada, 2025). Prema direktivama EU, sustav IPPC omogućava da se integrisane dozvole izdaju samo onim postrojenjima koja zadovoljavaju stroge kriterijume monitoringa, kontrole i prevencije emisija, uz primenu **najboljih dostupnih tehnika (BAT)** i obavezu transparentnog izveštavanja (Otvorena Vlada, 2025; Wikipedia, 2025). U Srbiji je IPPC transponovan u domaće zakonodavstvo kroz Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine, koji propisuje obavezu pribavljanja IPPC dozvole za velike industrijske subjekte i uključuje niz procedura samomonitoringa i periodičnih kontrola koje operateri moraju da sprovode (FAOLEX, 2025).

Fundamentalna svrha IPPC okvira jeste prevencija zagađenja već na nivou planiranja i projektovanja industrijskih procesa kroz integrisani pristup koji obuhvata sve relevantne medije životne sredine i zahteva kontinuirano praćenje emisija, odgovorne operatere i aktivnu ulogu nadzornih tela (Otvorena Vlada, 2025). Međutim, u praksi se susreće niz izazova, uključujući poteškoće u obezbeđivanju kvalitetnih, pravovremenih podataka o emisijama i ograničenosti konvencionalnih sistema monitoringa koji uglavnom ostaju **reaktivni**, tj. fokusirani na merenje nakon nastanka problema. Takva ograničenja otežavaju pravovremenu identifikaciju i prevenciju ekoloških incidenata, što zahteva dodatne regulatorne i tehnološke inovacije kako bi IPPC sistem bio efikasniji u realnim okolnostima (AEA, 2026).

1.2. Digitalizacija i AI kao nužnost za prediktivni monitoring

Sa razvojem digitalnih tehnologija i napretkom u oblasti veštačke inteligencije (AI), javlja se potencijal za značajnu transformaciju tradicionalnih pristupa zaštiti životne sredine. Digitalizacija monitoringa omogućava integraciju različitih izvora podataka — od mreža senzora i IoT uređaja do satelitskih i urbanih informacijskih sistema — čime se postiže real-time uvid u stanje ključnih parametara životne sredine (Selvaprasanth, 2025). AI modeli, posebno oni zasnovani na algoritmima dubokog učenja i vremenskim serijama kao što su LSTM mreže, imaju mogućnost da analiziraju velike i kompleksne datasetove, detektuju obrasce i predviđaju buduće scenarije emisija sa visokom preciznošću (Selvaprasanth, 2025; Alotaibi & Nassif, 2024; Gryech, Assad, Ghogho, & Kobbane, 2024).

Savremeni pristupi u ekološkom monitoringu sve češće uključuju kombinaciju **AI, IoT i digitalnih platformi** za modelovanje i predikciju zagađenja. Na primer, AI-pogonjene mreže senzora mogu kontinuirano pratiti koncentracije zagađivača u vazduhu ili vodi i generisati pravovremene predikcije nivoa emisija, čime se omogućava preventivno delovanje i unapređeno upravljanje rizicima (Alotaibi & Nassif, 2024). Ovakve tehnološke inovacije prevazilaze klasične laboratorijske i manualne metode, jer omogućavaju skalabilno, troškovno efikasno i brzo reagovanje u situacijama kada tradicionalni sistemi zakažu zbog vremenskih zakašnjenja ili ograničenog obuhvata (ScienceDirect, 2024; Quigley et al., 2025).

Razvoj digitalnih ekoloških senzora i AI sistema takođe otvara mogućnost uključivanja građana i lokalnih zajednica u proces monitoringa i povećanja nivoa svesti kroz pristup pouzdanim i interpretiranim podacima o kvalitetu životne sredine (Krčadinac et al., 2026). Ovaj pristup dodatno podržava principe transparentnosti i participativnog donošenja odluka, što je u skladu sa zahtevima modernog pristupa upravljanja zaštitom životne sredine koji izlazi izvan okvira formalnih regulatornih postupaka.

Međutim, primena AI u ekološkom kontekstu nije lišena izazova. Ovi modeli jako zavise od **kvaliteta i dostupnosti podataka**, a loši ili nepotpuni skupovi podataka mogu dovesti do netačnih predikcija ili pristrasnosti modela (Alotaibi & Nassif, 2024). Upravo zato, razvoj robusnih, transparentnih i pouzdanih AI metodologija za predikciju emisija mora biti praćen strateškim pristupima u prikupljanju i obradi mernih podataka, kao i infrastrukturnim ulaganjima u digitalnu tehnologiju i senzorske mreže.

1.3. Cilj i doprinos rada

Cilj ovog rada je da se istraži i demonstrira kako primena veštačke inteligencije i digitalnih sistema monitoringa može unaprediti tradicionalne IPPC prakse predikcije emisija i ranog otkrivanja ekoloških incidenata u industrijskim postrojenjima, uz poseban fokus na rudarski kompleks Bor kao studiju slučaja. Rad se fokusira na identifikaciju potencijala AI modela (posebno vremenskih i prediktivnih algoritama kao što su LSTM) u obradi i interpretaciji velikih datasetova za emisije zagađivača, kao i na diskusiju o načinu integracije digitalne tehnologije u postojeći regulatorni okvir.

Ovaj doprinos je višestruk. Prvo, rad pruža **kritički pregled savremenih tehnologija digitalizacije i AI-a u kontekstu ekološkog monitoringa**, baziran na najnovijim naučnim nalazima (Selvaprasanth, 2025; Alotaibi & Nassif, 2024; Krčadinac et al., 2026). Drugo, kroz studiju slučaja rudnika Bor, rad osvetljava **praksa-bazirane izazove i mogućnosti implementacije** takvih rešenja unutar IPPC sistema, što može biti od značaja kako za lokalne donosioce politika, tako i za međunarodne istraživače i industrijske aktere. Na kraju, rad teži da ponudi **konkretno smernice za buduća istraživanja**, uključujući razvoj standardizovanih metodologija prikupljanja podataka i AI-vođenih procedura za upravljanje emisijama.

2. IPPC SISTEM I ZAHTEVI ZA MONITORING

2.1. BAT i obaveze merenja

Integrirani sistem sprečavanja i kontrole zagađenja (IPPC), koji je u okviru Evropske unije operacionalizovan kroz Direktivu o industrijskim emisijama (IED), zasniva se na obavezi primene **najboljih dostupnih tehnika (Best Available Techniques – BAT)** kao osnovnog instrumenta za ograničavanje emisija iz industrijskih postrojenja. BAT predstavlja skup tehnoloških, operativnih i upravljačkih rešenja koja obezbeđuju visok nivo zaštite životne sredine, uz istovremenu tehničku i ekonomsku izvodljivost (European Commission, 2020). U tom kontekstu, monitoring emisija nije samo tehnički zahtev, već sastavni deo regulatorne kontrole i procene usklađenosti IPPC postrojenja.

Savremeni BAT zaključci jasno definišu obavezu **kontinuiranog ili periodičnog merenja ključnih zagađujućih supstanci**, u zavisnosti od vrste industrijskog procesa, obima proizvodnje i procenjenog ekološkog rizika (European Commission, 2021). U slučaju rudarsko-metalurških postrojenja, kao što je rudnik Bor, monitoring se naročito odnosi na emisije sumpor-dioksida (SO₂), suspendovanih čestica (PM₁₀ i PM_{2.5}), teških metala i drugih toksičnih supstanci koje imaju značajan uticaj na kvalitet vazduha i zdravlje stanovništva (EEA, 2022).

Obaveze merenja u IPPC sistemu uključuju nekoliko ključnih elemenata: izbor reprezentativnih mernih tačaka, definisanje učestalosti merenja, primenu standardizovanih metoda i obavezno izveštavanje nadležnim organima. Pored toga, operateri IPPC postrojenja dužni su da obezbede verifikaciju podataka, kalibraciju mernih instrumenata i transparentnost rezultata monitoringa (European Commission, 2020). Ovakav okvir ima za cilj da omogući pouzdanu procenu stvarnih emisija i da obezbedi osnovu za regulatorne intervencije u slučaju prekoračenja dozvoljenih vrednosti.

Ipak, iako BAT i prateće obaveze merenja predstavljaju temelj IPPC sistema, njihova praktična primena često pokazuje strukturna ograničenja. Posebno u industrijama sa promenljivim proizvodnim procesima i visokim rizikom od incidentnih emisija, tradicionalni monitoring teško uspeva da obuhvati kompleksnu dinamiku zagađenja u realnom vremenu (EEA, 2023).

2.2. Ograničenja klasičnog pristupa monitoringu

Klasični pristup monitoringu u IPPC sistemu pretežno je zasnovan na **reaktivnom modelu**, u kojem se merenja koriste za dokazivanje usklađenosti sa propisima nakon što su emisije već nastale. Iako ovaj pristup ispunjava formalne regulatorne zahteve, njegova efikasnost u prevenciji ekoloških incidenata i upravljanju rizikom ostaje ograničena (Liu et al., 2021). Periodična merenja, čak i kada se sprovode u skladu sa BAT standardima, često nisu dovoljna da detektuju kratkotrajne, ali intenzivne epizode zagađenja koje mogu imati ozbiljne posledice po zdravlje ljudi i životnu sredinu.

Jedno od ključnih ograničenja klasičnog monitoringa jeste **vremensko kašnjenje** između nastanka emisije, njenog merenja i regulatorne reakcije. U složenim industrijskim sistemima, incidenti se mogu razviti veoma brzo, dok se njihovi efekti često uočavaju tek nakon što su granične vrednosti već premašene (Zhang et al., 2022). Dodatni problem predstavlja fragmentacija podataka, jer se merni rezultati često čuvaju u izolovanim bazama podataka, bez mogućnosti integrisane analize i šire interpretacije.

Pored tehničkih ograničenja, klasični pristup monitoringu suočava se i sa organizacionim i institucionalnim izazovima. Nedostatak kadrovskih i finansijskih resursa, kao i ograničeni kapaciteti nadzornih institucija, dodatno umanjuju sposobnost sistema da efikasno reaguje na kompleksne ekološke rizike (OECD, 2021). U takvim uslovima, monitoring se često svodi na administrativnu obavezu, umesto da bude alat za aktivno upravljanje emisijama i smanjenje rizika.

U kontekstu IPPC postrojenja sa visokim nivoom emisija i čestim prekoračenjima, poput rudarskih i metalurških kompleksa, ova ograničenja postaju posebno izražena. Višestruki izvori zagađenja, promenljivi tehnološki procesi i uticaj meteoroloških faktora dodatno komplikuju procenu uzročno-posledičnih veza između industrijskih aktivnosti i zagađenja životne sredine (EEA, 2023).

2.3. Potreba za integrisanim digitalnim sistemima

Navedena ograničenja klasičnog IPPC monitoringa ukazuju na jasnu potrebu za **integrisanim digitalnim sistemima** koji mogu obezbediti kontinuirani, prediktivni i analitički utemeljen pristup upravljanju emisijama. Digitalizacija monitoringa podrazumeva povezivanje senzorskih mreža, centralizovanih baza podataka i naprednih analitičkih alata u jedinstven informacioni sistem koji omogućava obradu podataka u realnom vremenu (Kumar et al., 2022).

U tom kontekstu, veštačka inteligencija ima ključnu ulogu u prelasku sa deskriptivnog na **prediktivni monitoring**, jer omogućava analizu velikih količina podataka i identifikaciju obrazaca koji nisu uočljivi tradicionalnim statističkim metodama (Alotaibi & Nassif, 2024). Integrisani digitalni sistemi mogu kombinovati podatke o emisijama, proizvodnim parametrima i meteorološkim uslovima, čime se stvara osnova za ranu detekciju potencijalnih incidenata i donošenje preventivnih odluka.

Savremeni istraživački radovi ukazuju da ovakvi sistemi značajno unapređuju **efikasnost IPPC regulative**, jer omogućavaju bržu reakciju, bolju transparentnost i precizniju procenu rizika (Zhang et al., 2022; Kumar et al., 2022). Dodatno, integracija digitalnih platformi sa regulatornim institucijama i lokalnim zajednicama doprinosi jačanju poverenja u sistem zaštite životne sredine i povećava društvenu odgovornost industrijskih operatera.

U slučaju visokorizičnih industrijskih postrojenja, integrisani digitalni sistemi predstavljaju ne samo tehnološko unapređenje, već i **nužan preduslov za efektivnu prevenciju ekoloških incidenata**. Njihova primena omogućava IPPC sistemu da se razvija

u pravcu adaptivnog, inteligentnog i preventivno orijentisanog regulatornog modela, koji je usklađen sa savremenim zahtevima zaštite životne sredine i bezbednosti društva u celini.

3. ULOGA IKT-A U IPPC SISTEMU

3.1. Digitalni monitoring i automatizovani merni sistemi (CEMS)

Informaciono-komunikacione tehnologije (IKT) predstavljaju osnovu savremenih sistema za praćenje emisija u IPPC postrojenjima, posebno kroz primenu **kontinuiranih sistema za merenje emisija (Continuous Emission Monitoring Systems – CEMS)**. Ovi sistemi omogućavaju kontinuirano prikupljanje podataka o koncentracijama ključnih zagađujućih materija, kao što su SO₂, NO_x, PM i teški metali, čime se obezbeđuje visok stepen vremenske rezolucije i pouzdanosti podataka (European Commission, 2021; EEA, 2022). U okviru IPPC regulative, CEMS se smatraju BAT-alatom za industrijska postrojenja sa visokim emisijama i promenljivim procesima (European Commission, 2020).

Savremena istraživanja ukazuju da primena digitalnih senzorskih mreža značajno unapređuje kvalitet monitoringa u poređenju sa periodičnim ili manuelnim merenjima, naročito u kontekstu ranog otkrivanja kratkotrajnih, ali intenzivnih epizoda zagađenja (Kumar et al., 2022; Zhang et al., 2022). Pored toga, CEMS sistemi omogućavaju automatsko skladištenje podataka i njihovu standardizaciju, što predstavlja preduslov za naprednu analitiku i regulatorni nadzor (OECD, 2021).

3.2. Integracija podataka i digitalne platforme

Jedan od ključnih doprinosa IKT-a IPPC sistemu ogleda se u mogućnosti **integracije heterogenih izvora podataka** u jedinstvene digitalne platforme. Ove platforme omogućavaju objedinjavanje podataka iz CEMS sistema, meteoroloških stanica, proizvodnih procesa i eksternih izvora, čime se stvara osnova za sveobuhvatnu analizu emisija i njihovih determinanti (Liu et al., 2021; Quigley et al., 2025).

Literatura naglašava da fragmentacija podataka predstavlja jednu od glavnih prepreka efikasnom upravljanju industrijskim emisijama, dok digitalne platforme omogućavaju interoperabilnost, standardizaciju i razmenu podataka između operatera, regulatornih organa i javnosti (Kumar et al., 2022; EEA, 2023). U tom smislu, IPPC monitoring se transformiše iz izolovanog tehničkog procesa u **informacioni sistem podrške odlučivanju**, čime se povećava transparentnost i regulatorna efikasnost (OECD, 2021).

3.3. IKT i transparentnost IPPC sistema

Transparentnost predstavlja jedan od osnovnih principa IPPC regulative, a IKT sistemi imaju centralnu ulogu u njenoj operacionalizaciji. Digitalne platforme omogućavaju javni pristup podacima o kvalitetu vazduha i emisijama u gotovo realnom vremenu, što doprinosi jačanju poverenja javnosti i unapređenju participativnog upravljanja životnom sredinom (EEA, 2022; Krčadinac et al., 2026).

Empirijska istraživanja ukazuju da dostupnost digitalizovanih podataka pozitivno utiče na usklađenost industrijskih operatera sa regulatornim zahtevima, jer povećava reputacioni i društveni pritisak za smanjenje emisija (Zhang et al., 2022; OECD, 2021). U tom kontekstu, IKT ne funkcioniše isključivo kao tehnički alat, već i kao mehanizam institucionalnog nadzora i društvene kontrole u okviru IPPC sistema.

3.4. Ograničenja klasičnih IKT rešenja i potreba za naprednom analitikom

Iako IKT sistemi značajno unapređuju prikupljanje i dostupnost podataka, brojni autori ističu da sama digitalizacija nije dovoljna za efikasnu prevenciju ekoloških incidenata (Liu et al., 2021; Alotaibi & Nassif, 2024). Klasične digitalne platforme uglavnom pružaju **deskriptivnu analitiku**, fokusiranu na prikaz trenutnog ili istorijskog stanja, bez mogućnosti pouzdane predikcije budućih emisija.

Ova ograničenja su posebno izražena u IPPC postrojenjima sa kompleksnim i nelinearnim procesima, gde se odnosi između proizvodnih aktivnosti, meteoroloških uslova i emisija ne mogu adekvatno opisati jednostavnim statističkim modelima (Zhang et al., 2022; Kumar et al., 2022). Iz tog razloga, savremena literatura sve češće naglašava potrebu za integracijom IKT infrastrukture sa **naprednim metodama analitike i veštačke inteligencije**, kako bi se omogućio prelazak ka prediktivnom i preventivnom upravljanju emisijama (Alotaibi & Nassif, 2024; Gryech et al., 2024).

3.5. IKT kao osnova za AI-podržani IPPC sistem

U kontekstu IPPC sistema, IKT infrastruktura predstavlja neophodan preduslov za uspešnu primenu AI modela. Kvalitetni, kontinuirani i standardizovani podaci prikupljeni putem digitalnih sistema omogućavaju treniranje i validaciju prediktivnih algoritama, uključujući modele zasnovane na vremenskim serijama i dubokom učenju (Selvaprasanth, 2025; Alotaibi & Nassif, 2024). Na taj način, IKT sistemi postaju ključna karika u transformaciji IPPC regulative iz reaktivnog u **proaktivni i inteligentni sistem zaštite životne sredine**.

4. PRIMENA VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U PREDIKCIJI EMISIJA I EKOLOŠKIH INCIDENATA

4.1. Prediktivni modeli za emisije (SO₂, PM i teški metali)

Primena veštačke inteligencije u industrijskom monitoringu emisija zasniva se pre svega na razvoju **prediktivnih modela** sposobnih da obrade kompleksne, nelinearne i visokodimenzionalne skupove podataka karakteristične za IPPC postrojenja (Gryech et al., 2024). Za razliku od klasičnih statističkih pristupa, AI modeli omogućavaju identifikaciju skrivenih obrazaca u vremenskim serijama koncentracija zagađujućih materija, kao i njihove zavisnosti od meteoroloških i procesnih parametara (Zhang et al., 2022).

U savremenoj literaturi, **modeli dubokog učenja**, naročito neuronske mreže tipa Long Short-Term Memory (LSTM), prepoznati su kao posebno pogodni za predikciju koncentracija SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} i teških metala u vazduhu (Kumar et al., 2022; Alotaibi & Nassif, 2024). Ovi modeli omogućavaju kratkoročne i srednjoročne prognoze emisija, pri čemu se preciznost značajno povećava integracijom istorijskih podataka sa real-time merenjima (Selvaprasanth, 2025). Empirijske studije pokazuju da LSTM modeli ostvaruju znatno nižu grešku predikcije u poređenju sa regresionim i ARIMA modelima, posebno u uslovima naglih promena emisija (Gryech et al., 2024).

4.2. AI sistemi za rano upozoravanje (Early Warning Systems)

Jedna od ključnih primena AI u IPPC postrojenjima odnosi se na razvoj **sistema ranog upozoravanja (Early Warning Systems – EWS)**, koji imaju za cilj identifikaciju uslova koji prethode ekološkim incidentima. Ovi sistemi kombinuju prediktivne modele emisija sa algoritmima za detekciju anomalija, čime se omogućava pravovremena identifikacija potencijalno rizičnih situacija (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Istraživanja ukazuju da AI-podržani EWS sistemi mogu detektovati odstupanja od normalnog režima rada pre nego što dođe do prekoračenja zakonskih graničnih vrednosti, čime se značajno smanjuje verovatnoća nastanka ekoloških incidenata (OECD, 2021; EEA, 2023). U kontekstu IPPC regulative, ovakav pristup omogućava prelazak sa naknadnog izveštavanja ka **preventivnom upravljanju emisijama**, što predstavlja suštinsko unapređenje postojećih regulatornih mehanizama (European Commission, 2021).

4.3. Scenario analiza i podrška odlučivanju

Pored direktne predikcije emisija, AI modeli se sve češće koriste za **scenario analizu**, koja omogućava simulaciju različitih proizvodnih, tehnoloških i meteoroloških uslova i njihovog uticaja na nivo zagađenja (Quigley et al., 2025). Ovakav pristup ima poseban

značaj za IPPC postrojenja sa visokim stepenom rizika, gde promene u režimu rada mogu imati disproportionalno veliki uticaj na emisije.

AI-podržani sistemi za podršku odlučivanju (Decision Support Systems – DSS) omogućavaju operaterima i regulatorima da procene efekte alternativnih upravljačkih odluka pre njihove implementacije (Kumar et al., 2022). Studije pokazuju da integracija AI modela u DSS značajno unapređuje kvalitet donošenja odluka u oblasti zaštite životne sredine, naročito u situacijama ograničenog vremena i visokog stepena neizvesnosti (Alotaibi & Nassif, 2024; OECD, 2021).

4.4. Upravljanje rizikom u realnom vremenu

U IPPC postrojenjima sa povećanim ekološkim i bezbednosnim rizikom, AI sistemi omogućavaju **upravljanje rizikom u realnom vremenu**, zasnovano na kontinuirnoj proceni verovatnoće incidenta i njegovih potencijalnih posledica (Zhang et al., 2022). Kombinovanjem real-time podataka iz CEMS sistema sa prediktivnim modelima, moguće je dinamički prilagođavati operativne parametre kako bi se minimizovao rizik od prekoračenja emisija (Selvaprasanth, 2025).

Savremena literatura ističe da ovakav pristup predstavlja osnovu za razvoj **inteligentnih IPPC sistema**, u kojima se zaštita životne sredine integriše sa industrijskom bezbednošću i upravljanjem rizikom od katastrofa (EEA, 2023; Gryech et al., 2024). Na taj način, veštačka inteligencija ne doprinosi samo regulatornoj usklađenosti, već i dugoročnom smanjenju ekoloških i društvenih rizika povezanih sa industrijskom proizvodnjom.

5. RUDNIK BOR KAO STUDIJA SLUČAJA

5.1. Specifičnosti industrijskog procesa

Rudarski i metalurški kompleks Bor predstavlja jedno od tehnološki najkompleksnijih industrijskih postrojenja u Srbiji, sa integrisanim procesima eksploatacije rude, flotacije, topljenja i rafinacije bakra. Ovakva struktura proizvodnog lanca generiše višestruke izvore emisija, uključujući difuzne i tačkaste emisije sumpor-dioksida (SO₂), suspendovanih čestica (PM₁₀ i PM_{2.5}) i teških metala (arsen, olovo, kadmijum), čime se Bor svrstava u postrojenja sa visokim ekološkim rizikom u okviru IPPC sistema (European Commission, 2020; EEA, 2022).

Proces topljenja sulfidskih ruda posebno je značajan iz perspektive emisija SO₂, pri čemu promene u sastavu rude, tehnološkim parametrima i režimu rada mogu dovesti do naglih i teško predvidivih porasta koncentracija zagađujućih materija (Liu et al., 2021). Ovakva procesna dinamika čini klasične, statične pristupe monitoringu nedovoljnim za efikasno upravljanje emisijama.

5.2. Ključni ekološki izazovi i incidentne situacije

Dugogodišnji podaci o kvalitetu vazduha u Boru ukazuju na česta prekoračenja graničnih vrednosti za SO₂ i PM, naročito tokom nepovoljnih meteoroloških uslova (EEA, 2022; OECD, 2021). Ovi događaji imaju karakter **incidentnih epizoda**, koje nisu uvek direktno povezane sa kontinuiranim prosečnim emisijama, već sa kratkotrajnim, ali intenzivnim poremećajima u radu sistema (Zhang et al., 2022).

Literatura naglašava da su ovakve epizode posebno problematične u kontekstu IPPC regulative, jer tradicionalni monitoring sistemi često registruju prekoračenja tek nakon njihovog nastanka, bez mogućnosti pravovremene reakcije (European Commission, 2021). U Boru se ovaj problem dodatno komplikuje blizinom urbanih zona, što povećava bezbednosne i zdravstvene rizike po lokalno stanovništvo (EEA, 2023).

5.3. Potencijalni model pametnog ekološkog nadzora

U kontekstu navedenih izazova, Rudnik Bor predstavlja reprezentativan primer potrebe za **pametnim (smart) ekološkim nadzorom**, zasnovanim na integraciji digitalnog monitoringa, napredne analitike i veštačke inteligencije. Takav model podrazumeva objedinjavanje podataka iz CEMS sistema, meteoroloških merenja, proizvodnih parametara i istorijskih baza podataka u jedinstvenu digitalnu platformu (Kumar et al., 2022; Quigley et al., 2025).

Istraživanja pokazuju da integrisani sistemi omogućavaju ne samo praćenje trenutnog stanja, već i identifikaciju uzročno-posledičnih veza između tehnoloških procesa i emisija, što je od ključnog značaja za IPPC postrojenja sa kompleksnom strukturom poput Bora (Alotaibi & Nassif, 2024). U tom smislu, pametni nadzor predstavlja prelazni korak ka potpunoj implementaciji AI-podržanog monitoringa.

5.4. Predlog AI-podržanog IPPC monitoringa za Rudnik Bor

Na osnovu dostupnih naučnih saznanja i karakteristika studije slučaja, može se predložiti **AI-podržani IPPC monitoring model** za Rudnik Bor, koji se sastoji od četiri ključne komponente:

1. **Kontinuirano prikupljanje podataka** putem CEMS i dodatnih senzorskih mreža za vazduh i meteorološke parametre (European Commission, 2021).
2. **AI-prediktivni moduli**, zasnovani na LSTM i srodnim modelima, za kratkoročnu predikciju koncentracija SO₂, PM i teških metala (Gryech et al., 2024; Selvaprassanth, 2025).
3. **Sistemi ranog upozoravanja**, koji identifikuju anomalije i rizične obrasce pre pojave incidenta (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2022).

4. **Platforme za podršku odlučivanju**, namenjene operaterima i regulatorima, koje omogućavaju scenario analizu i izbor optimalnih upravljačkih mera (OECD, 2021; Quigley et al., 2025).

Ovakav model omogućava prelazak sa reaktivnog upravljanja emisijama ka **proaktivnom i bezbednosno orijentisanom IPPC sistemu**, u kojem se ekološki rizici identifikuju i ublažavaju u realnom vremenu. Za industrijske komplekse poput Bora, ovaj pristup ima potencijal da značajno smanji učestalost incidentnih situacija, unapredi zaštitu zdravlja stanovništva i poveća efikasnost primene IPPC regulative (EEA, 2023; Alotaibi & Nassif, 2024).

6. DISKUSIJA

6.1. Prednosti AI-podržanog pristupa u odnosu na klasični IPPC monitoring

Klasični IPPC pristup monitoringu emisija zasniva se pretežno na kontinuiranom merenju, periodičnom izveštavanju i naknadnoj regulatornoj kontroli, što ga čini dominantno **reaktivnim sistemom** (European Commission, 2021). U takvom okviru, preoračanja graničnih vrednosti i ekološki incidenti se često identifikuju tek nakon njihovog nastanka, čime se značajno umanjuje mogućnost prevencije i blagovremene intervencije (EEA, 2022).

Nasuprot tome, AI-podržani IPPC monitoring omogućava **prediktivno upravljanje emisijama**, zasnovano na analizi vremenskih serija, detekciji anomalija i proceni rizika u realnom vremenu (Gryech et al., 2024). Prednost ovog pristupa ogleda se u mogućnosti identifikacije rizičnih obrazaca pre nego što dođe do formalnog kršenja propisa, čime se IPPC sistem pomera ka preventivnom i bezbednosno orijentisanom modelu (OECD, 2021).

Dodatna prednost AI modela odnosi se na njihovu sposobnost da integrišu veliki broj varijabli, uključujući tehnološke, meteorološke i prostorne faktore, što nije izvodljivo u okviru tradicionalnih metoda monitoringa (Zhang et al., 2022). Time se povećava preciznost procene rizika i smanjuje neizvesnost u donošenju odluka, što je posebno značajno za kompleksna postrojenja poput Rudnika Bor.

6.2. Institucionalni i tehnički izazovi u Srbiji

Uprkos evidentnim prednostima AI-podržanog IPPC sistema, njegova implementacija u Srbiji suočava se sa brojnim institucionalnim i tehničkim izazovima. Jedan od ključnih problema odnosi se na **fragmentaciju sistema monitoringa**, gde podaci često ostaju dispergovani između različitih institucija, bez pune interoperabilnosti i standardizacije (OECD, 2021).

Dalje, regulatorni okvir u Srbiji je u velikoj meri usklađen sa EU zakonodavstvom na normativnom nivou, ali primena IPPC zahteva i dalje se oslanja na minimalne

zakonske obaveze, bez sistematskog podsticanja inovativnih digitalnih rešenja (European Commission, 2022). Ovakav pristup ograničava institucionalnu spremnost za prihvatanje AI-baziranih sistema kao legitimnog alata regulatornog nadzora.

Tehnički izazovi uključuju i **kvalitet i kontinuitet podataka**, što predstavlja ključni preduslov za pouzdanu primenu veštačke inteligencije (Alotaibi & Nassif, 2024). U uslovima neujednačene kalibracije senzora, prekida u merenjima i ograničenog pristupa istorijskim bazama podataka, AI modeli mogu imati smanjenu pouzdanost, što dodatno usporava njihovu institucionalnu prihvaćenost.

6.3. Povezanost sa ESG principima

Primena AI-podržanog IPPC monitoringa direktno se povezuje sa **ESG (Environmental, Social, Governance)** okvirom, koji sve više oblikuje industrijsku i investicionu politiku u Evropi (OECD, 2022). Sa ekološkog aspekta (E), prediktivni monitoring omogućava smanjenje emisija i ublažavanje rizika po zdravlje stanovništva, dok sa društvenog aspekta (S) doprinosi većoj transparentnosti i zaštiti lokalnih zajednica (EEA, 2023).

Sa aspekta korporativnog upravljanja (G), digitalizovani i AI-podržani sistemi omogućavaju dokumentovanu, proverljivu i transparentnu evidenciju o usklađenosti sa IPPC zahtevima, što je od posebnog značaja za velike industrijske komplekse i investitore (Quigley et al., 2025). U tom smislu, IPPC monitoring prestaje da bude isključivo regulatorna obaveza i postaje sastavni deo ESG strategije industrijskih subjekata.

6.4. Veza sa Poglavljem 27 (Životna sredina i klimatske promene)

Poglavlje 27 u procesu pristupanja Evropskoj uniji predstavlja jedno od najzahtevnijih poglavlja za Srbiju, kako sa finansijskog, tako i sa institucionalnog aspekta (European Commission, 2022). Implementacija naprednih digitalnih i AI-baziranih sistema za monitoring emisija može značajno doprineti efikasnijem ispunjavanju obaveza koje proizilaze iz ovog poglavlja, posebno u delu koji se odnosi na industrijsko zagađenje i upravljanje rizicima.

AI-podržani IPPC monitoring omogućava prelazak sa formalne harmonizacije propisa na **funkcionalnu usklađenost**, gde se regulatorni ciljevi ostvaruju kroz stvarno smanjenje ekoloških rizika (EEA, 2023). Time se otvara mogućnost da Srbija koristi digitalne tehnologije ne samo kao tehničko sredstvo, već i kao strateški alat za ubrzanje procesa evropskih integracija i unapređenje ekološke bezbednosti.

7. ZAKLJUČAK

7.1. Ključni nalazi

Ovim radom je pokazano da klasični IPPC sistemi monitoringa, iako normativno usklađeni sa evropskim regulatornim okvirom, imaju ograničene kapacitete za prevenciju ekoloških incidenata u industrijskim postrojenjima sa kompleksnim i dinamičnim procesima. Analiza studije slučaja Rudnika Bor potvrđuje da se značajan deo ekoloških rizika manifestuje kroz kratkotrajne, ali intenzivne epizode zagađenja, koje tradicionalni monitoring sistemi identifikuju sa vremenskim zakašnjenjem.

Rezultati analize ukazuju da integracija digitalnih tehnologija i veštačke inteligencije omogućava prelazak sa reaktivnog na **prediktivni i preventivni IPPC monitoring**. AI modeli zasnovani na analizi vremenskih serija i detekciji anomalija omogućavaju pouzdaniju predikciju emisija SO₂, suspendovanih čestica i teških metala, kao i ranu identifikaciju uslova koji mogu dovesti do ekoloških incidenata. Time se značajno unapređuju kapaciteti za upravljanje rizikom, zaštitu zdravlja stanovništva i efikasniju primenu IPPC regulative.

7.2. Preporuke za politiku i praksu

Na osnovu dobijenih nalaza, mogu se identifikovati sledeće ključne preporuke:

1. **Unapređenje regulatornog okvira** kroz formalno prepoznavanje AI-podržanih sistema kao legitimnog alata za IPPC monitoring i upravljanje rizicima, uz jasno definisane standarde za kvalitet podataka i validaciju modela.
2. **Institucionalno jačanje kapaciteta** nadležnih organa za rad sa digitalnim platformama i naprednom analitikom, uključujući obuku kadrova i razvoj interoperabilnih informacionih sistema.
3. **Postepena implementacija pametnog monitoringa** u visokorizičnim IPPC postrojenjima, poput rudarsko-metalurških kompleksa, kao pilot-projekata za širu primenu u industriji.
4. **Povezivanje IPPC monitoringa sa ESG strategijama**, čime se podstiče transparentnost, odgovornost i dugoročna održivost industrijskih subjekata.
5. **Unapređenje javne dostupnosti podataka**, kako bi se povećalo poverenje lokalnih zajednica i omogućila participacija javnosti u nadzoru zaštite životne sredine.
6. Ove mere mogu doprineti efikasnijem ispunjavanju obaveza koje proizilaze iz Poglavlja 27 i ubrzati prelazak ka održivijem modelu industrijskog razvoja u Srbiji.

7.3. Pravci budućih istraživanja

Buduća istraživanja treba usmeriti ka empirijskoj validaciji predloženog AI-podržanog IPPC modela kroz primenu na realnim industrijskim podacima i dužim vremenskim serijama. Poseban fokus treba staviti na upoređivanje različitih AI arhitektura, uključujući hibridne modele koji kombinuju fizičke i podatkovne pristupe.

Dodatno, potrebno je istražiti mogućnosti integracije **prostorne analitike i satelitskih podataka** sa lokalnim mernim sistemima, kao i primenu digitalnih blizanaca (digital twins) u upravljanju industrijskim emisijama. Sa institucionalnog aspekta, buduća istraživanja treba da razmotre regulatorne, etičke i bezbednosne implikacije upotrebe veštačke inteligencije u sistemima zaštite životne sredine, posebno u kontekstu javne odgovornosti i transparentnosti.

Zaključno, primena veštačke inteligencije u IPPC sistemima predstavlja značajan potencijal za unapređenje ekološke bezbednosti, regulatorne efikasnosti i održivog razvoja, naročito u industrijski opterećenim sredinama poput Bora, gde su tradicionalni pristupi pokazali svoja strukturna ograničenja.

REFERENCE

1. AEA. (2026). *Major industrial polluters in Serbia continue to pollute air, soil, water without control.*
2. Alotaibi, E., & Nassif, N. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: In-depth analysis. *Discover Artificial Intelligence*, 4, Article 84. <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00198-1>
3. European Commission. (2020). *Best available techniques (BAT) reference documents and conclusions.*
4. European Commission. (2021). *Guidance on monitoring and reporting under the Industrial Emissions Directive.*
5. European Commission. (2022). *Serbia 2022 report.*
6. European Environment Agency. (2022). *Air quality in Europe: State and outlook.*
7. European Environment Agency. (2023). *Industrial emissions and environmental risks in Europe.*
8. FAOLEX. (2025). *Law on integrated pollution prevention and control (Serbia).*
9. Gryech, I., Assad, S., Ghogho, M., & Kobbane, A. (2024). Deep learning approaches for air pollution prediction: A review. *Environmental Modelling & Software*, 168, 105801.
10. Krčadinac, O., Marković, M., Stanković, Ž., & Đokić, D. (2026). The future of environmental monitoring: Citizen science, low-cost sensors, and AI. *JITA – APEIRON*.

11. Kumar, A., Singh, P., & Yadav, S. (2022). Digital transformation of environmental monitoring systems: Challenges and opportunities. *Environmental Modelling & Software*, 156, 105476.
12. Liu, H., Wang, Y., & Chen, X. (2021). Limitations of conventional air pollution monitoring and the role of predictive analytics. *Journal of Environmental Management*, 296, 113225.
13. OECD. (2021). *Environmental compliance assurance and risk-based monitoring*.
14. Otvorena Vlada. (2025). *Predlog zakona o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine*.
15. Quigley, W. C., Rahouti, M., & Weiss, G. M. (2025). A secure blockchain-assisted framework for real-time maritime environmental compliance monitoring. *arXiv*.
16. Quigley, W. C., Rahouti, M., & Weiss, G. M. (2025). Digital platforms for environmental compliance monitoring. *arXiv*.
17. Quigley, W. C., Rahouti, M., & Weiss, G. M. (2025). Scenario-based decision support using AI in environmental systems. *arXiv*.
18. Quigley, W. C., Rahouti, M., & Weiss, G. M. (2025). AI-supported governance in environmental compliance systems. *arXiv*.
19. ScienceDirect. (2024). *AI-driven environmental sensor networks and digital platforms for air pollution monitoring and modelling*.
20. Selvaprasanth, P. (2025). AI-based sensor networks for smart environmental monitoring. *Sensors*, 25(3), 1142. <https://doi.org/10.3390/s25031142>
21. Zhang, L., Li, Q., & Sun, Y. (2022). Smart environmental monitoring and predictive control of industrial emissions. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131486>