

MODELOVANJE ODRŽIVOG RUDARSTVA U KONTEKSTU TEHNOLOŠKOG NAPRETKA, EKOLOŠKE SVESTI I PRIVREDNOG RAZVOJA

Originalni naučni rad
DOI: 10.5937/GU_KORET25001D

Njegoš Dragović¹, Snežana Urošević^{2a}, Milovan Vuković^{2b}

¹ Metropolitan univerzitet Beograd,
njegos.dragovic@metropolitan.ac.rs, orcid.org/0000-0003-3634-4545

² Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor,
^a surosevic@tfbor.bg.ac.rs, orcid.org/0000-0002-6647-0449
^b mvukovic@tfbor.bg.ac.rs, orcid.org/0000-0003-1715-1078

Apstrakt: Prirodni resursi su ključna prednost većine država, pri čemu se teška industrija oslanja na eksploataciju i obradi metala. Posmatrana u mikro sredini, nalazišta površinske i podzemne eksploatacije mogu da doprinesu kako ekonomskoj ekspanziji, ukoliko se vraćaju sredstva lokalnoj sredini i zajednici, tako i ekološkoj opreznosti od usiljene prerade ruda i koncentrata.

U radu se razmatra održivost rudarstva u zavisnosti od uvođenja čistih tehnologija, dok se lokalna zajednica i stanovništvo uključuje u praćenje i izveštavanje o potencijalnim akcidentima, štetnim emisijama i zagađenjima vode, zemljišta i vazduha.
Ključne reči: Rudarstvo, održivost, tehnologija, ekologija, ekonomija

MODELING OF SUSTAINABLE MINNING IN CONTEXT OF TECHNOLOGICAL PROGRESS, ECOLOGICAL CONSENCE ANDECONOMIC DEVELOPMENT

Abstract: Natural resources are a key asset for most countries, with heavy industry relying on the exploitation and processing of metals. Viewed in a micro-environment, surface and underground mining sites can contribute both to economic expansion, if resources are returned to the local environment and community, and to environmental prudence from the forced production of ores and concentrates.

The paper discusses the sustainability of mining depending on the introduction of clean technologies, while involving the local community and population in monitoring and reporting on potential accidents, harmful emissions and pollution of water, soil and air.

Keywords: Minning; Sustainable; Technology; Ecology; Economy

1.UVOD

Savremeno poslovanje u oblasti rudarstva se suočava sa velikim izazovima, koje nameću pravne i obligacione procedure, a pre svega standardi u nekoliko oblasti,

kao što su procesna industrija, zaštita životne sredine, ulaganje u lokalnu zajednicu i privredni sistem nakon završetka životnog ciklusa rudarske eksploatacije.

Iskopavanje ruda je kompleksan proces, kome prethode predistražni postupci ležišta sirovina, te pripreme mineralnih sirovina, utvrđivanja učešća obojenih metala u rudi, plemenitih metala, pratećih metala. Istražno okno potencijalno može da pokaže dobre okvire za eksploataciju isplativih ruda u kojima se nalaze plemeniti i drugi metali, a koji mogu da iznesu ekonomičnost otvaranja rudnika. Naravno, najpoželjnije rešenje kod izbora potencijalnih rudnika bi bila površinska eksploatacija koja je retka, dok se podzemna eksploatacija najčešće javlja u stenskim masivima u dubini zemljine površine.

Sagledavanje eksploatacije ruda sa mineralima u velikim količinama, nanosima teških metala, ispuštanja u rečne tokove, odlaganje ostataka u jalovište, te obezbeđenje rada pri iskopavanju i transportu rude unutar jame, mogu biti ograničavajuće za proširenje eksploatacionih prava nad rudokopima.

Održivo rudarstvo nameće tezu da se iskopavanje, prevoz i obrada rude u koncentrate obavlja na kontrolisanom mestu, a odlaganje ostataka mora biti ispod prirodnih tokova voda, gde neće imati otvoren ciklus isticanja u reke. Rudarstvo može biti održivo kada se jalovišta na kraju ciklusa eksploatacije ruda i odlaganja ostataka prekrivaju plastikom, naslažu pod zemljom i sade stabla koja upijaju štetne metale, kao i korišćenjem ostataka u građevinskoj industriji ili remedijacijom zatvorenog kopa na kome se postavljaju solarne fotonaponske ćelije i slično.

2. RUDARSTVO U SRBIJI

Geološka građa teritorije Srbije je stenskog sastava različite starosti i porekla, koja je povezana sa pojavom ruda gvožđa, mangana, hroma, molibdena, bakra, olova i cinka. Rudarenjem su se na tlu Srbije bavili Kelti, Iliri, Rimljani i drugi koji su osvajali ove prostore tokom istorije. Smatra se da je ovo područje u praistoriji bilo središte rudarstva (Slika 1), što se predstavlja kroz nekoliko značajnih nalazišta, kao što su Krivo polje, Rujnik, Rudna glava, Mali Štulac, Belovode, Pločnik i Stojnik.



Slika 1. Nalazišta rudarenja na teritoriji Srbije u praistoriji (<http://ribeograd.ac.rs>)

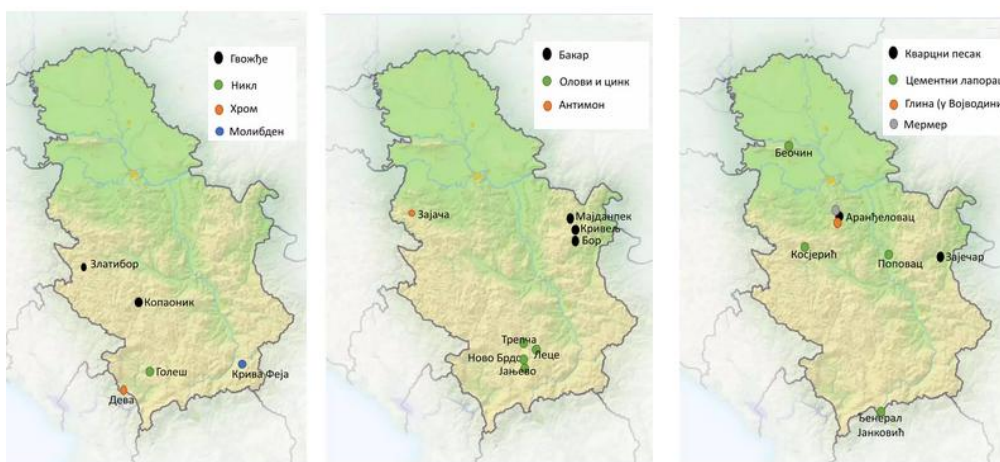
Srednjovekovno rudarstvo u Srbiji je regulisano kroz Rudarski zakonik despota Stefana Lazarevića, koji je objavljen 1412.godine. Razlog razvijenosti srpskog srednjovekovnog rudarstva su bili Sasi, koji su imali privilegije prilikom angažovanja. Tada počinje razvoj srednjovekovnog srpskog novca, a kovanje metala je bilo izuzetno razvijeno.

Podela mineralnih sirovina je izvršena na sledeći način:

- a) Metali (crni, obojeni i plemeniti) i
- b) Nemetali.

Crni metali su gvožđe, nikl, hrom, molibden. Obojeni metali su bakar, olovo, cink, antimon. Plemeniti metali su zlato, srebro, platina, živa.

Nemetali su cementni laporac, glina, kvarcni pesak, magnezit. Na slici 2 se vide nalazišta mineralnih sirovina u Srbiji.



Slika 2. Prikaz nalazišta crnih i obojenih metala sa nemetalima (Autor)

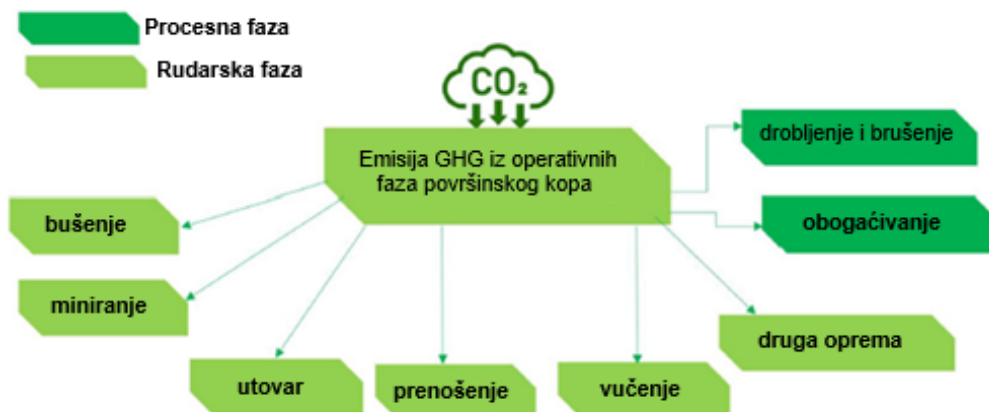
Glavna nalazišta ruda gvožđa su u planinama Rudnik, Kopaonik (Suvo Rudište, Belo brdo), u okolini Majdanpeka (Rudna Glava, Crnajka). Glavna nalazišta mangana u Srbiji su na Zlatiboru (Matarug, Dragonja i Rajac), Kopaoniku (Belo Brdo). Najznačajnija ležišta hroma su rudnici Babaj Boks, Deva, okolina Prizrena i na Šar planini, dok perspektiva postoji u okolini Valjeva, Čačka i Raške. Redak metal koji ima primenu u vojnoj industriji je molibden, koji ima nalazišta u Mačkatici, Kriva Feja i na planini Besna Kobilica, Tandi i Crnajki, kao i u Gnjilanu i Belo Brdo. Nikl služi za proizvodnju specijalnih tvrdih čelika, sa ležištima u Šumadiji (Stragari, Ba, Kadina Luka), Ibar (Stolovi, Željina), na Kosovu (Goleš, K.Mitrovica, Uroševac, Orahovac).

Obojeni metali na tlu Srbije su bakar, antimon, olovo, cink, magnezijum, bizmut i litijum. Bakar je metal koji se dosta koristi u elektronici za provodnike, a ležišta su na istoku Srbije (Bor, Majdanpek, Krivaja, Cerovo), okolini Valjeva i Rudnika, Kosova (Trepča, K.Mitrovica, Belo Brdo), Čadnje. Olovo se koristi u vojnoj i hemijskoj industriji, nuklearnoj tehnici i pri proizvodnji boja. Cink prati plemenite metale, a ide i primenjuje se kao i olovo. Ležišta olova i cinka su na Avali, Kosmaj, Rudnik, Krupanj, Zajača, Rađevina, Kostajnik, na planini Deli Jovan i Besna Kobilica, na Kosovu (Trepča,

Ajvalija, Novo Brdo, Janjevo, Kižica). Antimon je redak metal, koji se koristi u medicini, nuklearnoj tehnici, u proizvodnji elektronike, sa ležištima u Podrinju (Zajača, Rađevina, Krupanj), u blizini Bujanovca, Lisa kod Ivanjice.

3. PROBLEMI IZAZVANI USILJENIM RUDARSTVOM

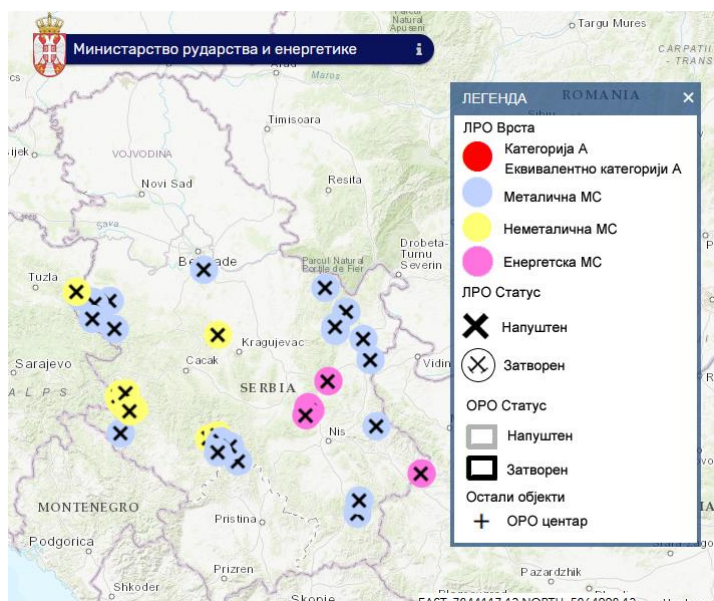
Rudarske operacije doprinose klimatskim promenama oslobađanjem emisija gasova staklene bašte (GHG) kao što su CH₄, azotni oksidi (NO_x) i ugljen-dioksid (CO₂) u atmosferu sagorevanjem goriva, proizvodnjom električne energije na licu mesta i drugim izvorima. Glavni izvori staklene bašte u rudarstvu su bušenje, miniranje, utovar, vuča i obogaćivanje operacije, kao i gorivo i električna energija koja se koristi u zavisnosti od prirode rude, kao što je prikazano na slici 2. Efekti se primećuju na lokalnom, regionalnom i globalnom nivou (Onifade i dr., 2024), te se sektor rudarstva suočava sa većom kontolom, pritiskom i umanjenom reputacijom zbog štete koju nanosi životnoj sredini, pa se zbog toga usvajaju održive proizvodne tehnologije.



Slika 2. Oslobađanje emisije gasova sa efektom staklene bašte iz rudarskih operacija

Da bi se smanjili negativni efekti, održivi rudnici reaguju usvajanjem strategija ublažavanja, koje podrazumevaju elektrifikaciju rudarske opreme, naročito ako je energija dobijena iz obnovljivih izvora (biodizel, prirodni gas), povećanjem energetske efikasnosti kroz faze, primenom naprednih operativnih procesa i slično. Integracija obnovljivih izvora energije kao što je solarna ili energija vetra u rudarskim operacijama može da smanji zavisnost od fosilnih goriva.

Svako iskopavanje može da izazove određene probleme, a osim toga rudarski otpad može da bude lokalni problem. Postoje nekoliko vrsta lokacija rudarskog otpada, od kategorije A, metalne, nemetalne i energetske mineralne sirovine. Na slici 3 prikazane su lokacije sa rudarskim otpadom na teritoriji Srbije.



Slika 3. Katastar ležišta rudarskog otpada u Srbiji (<https://kro.mre.gov.rs/jkro/>)

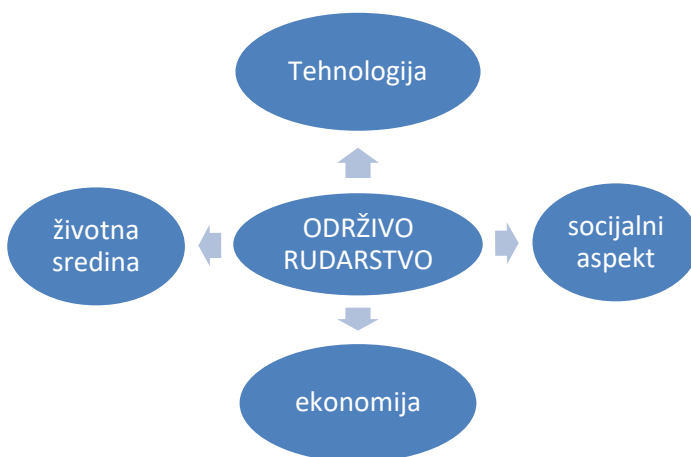
Napušteni i zatvoreni rudnici metala postoje širom Srbije, a najčešće su eksploatisani antimon, gvožđe i olovo i cink. Sa malim rezervama i zbog iscrpljivanja uglavnom se zatvaraju rudnici, kao što je 1953.godine zatvoren Rudnik olova i cinka Crveni breg na Avali. Sada se ovde studenti obučavaju za rad u podzemnoj eksploataciji. Na Avali takođe postoji još jedan napušten Rudnik Šuplja stena (zatvoren 1972.), sa eksploatacijom tečnog metala – žive. Zatvoreni rudnici su Rudnik antimona Zajača i Stolice u selu Kostajnik kod Krupnja, gvožđa Rudna Glava i Crnajka kod Majdanpeka, rudnik uranijuma Gabrovnica kod Knjaževca i rudnik molibdena Mačkatica kod Surdulice.

Prema katastru rudarskog otpada u Srbiji, ležišta Ravnaja (Krupanj), Bobija (Ljubovija), Brodica (Kučevo), Crni vrh (Majdanpek), Ruplje (Crna Trava), Suvo Rudište (Brus), Korlače i Rudnica (Raška) i drugi su napušteni.

Nosilac eksploatacije, na osnovu projektne dokumentacije je dužan da rekultiviše zemljište, tako da izvršiti sanaciju eksplotaciono dobra.

4. ODRŽIVO RUDARSTVO

Održivost je zasnovana na principima dugoričnog, stabilnog toka komponenti, koje ne proizvode greške ili štete, doprinoseći efikasnom i efektivnom stvaranju procesnih rezultata. Kod eksploatacije neobnovljivih mineralnih sirovina, u primarni fokus se stavlja čista tehnologija, učešće zajednice, zaštićeno okruženje i ostvarivanje ekonomskih blagodeti za makro i mikro sredinu. Savremeni pristup upravljanju mineralnim resursima i planiranje razvoja sektora rudarstva se zasniva na četiri elementa održive eksploatacije mineralnih sirovina sa tehnološkog, ekonomskog, ekološkog i sociološkog aspekta (Slika 4).



Slika 4. Četiri stuba održivog rudarstva

Održivim planom razvoja rudarskog sektora, definišu se faktori koji pokreću inovacije duž čitavog rudarskog lanca vrednosti (istraživanje, otvaranje, eksploatacija, prerada, dozvole, prekogranična eksploatacija, upravljanje otpadom, reciklaža, rehabilitacija i zatvaranje rudnika), saglasno preporučenim zahtevima za standardizaciju u Evropskoj uniji (Ignjatović i dr., 2025). Potrebno je da se reguliše transparentnost podataka, bezbednost i zaštita privatnosti, ali da se sprovodi obrazovna reforma i radna etika koja može uticati na inovacije kroz tehnološki razvoj u rudarstvu.

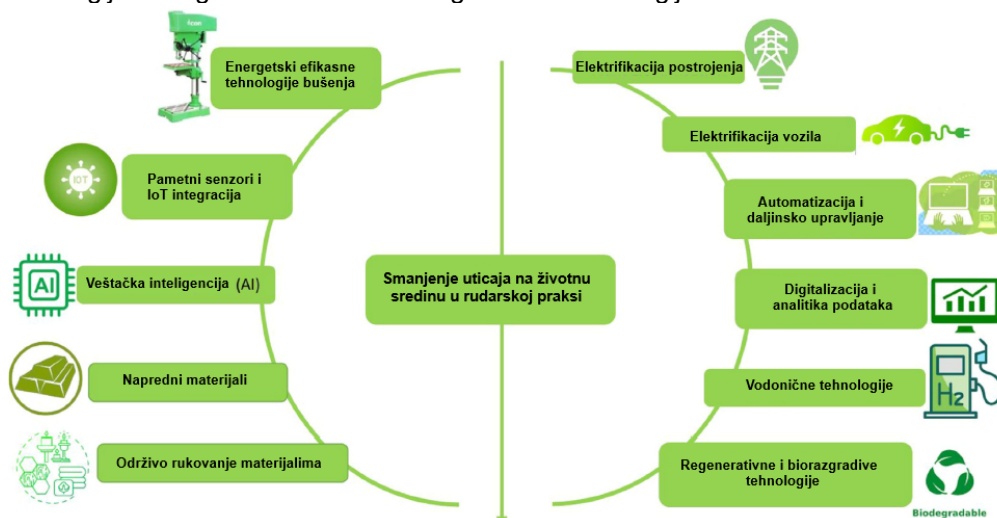
Glavni cilj održivog razvoja rudarstva u Republici Srbiji treba da bude zadovoljenje sve većih potreba za sirovinama, uz stalno nastojanje da prirodno i geološki uslovljeno locirana rudarska delatnost istovremeno bude pozitivni činilac, s obzirom na njen ukupni uticaj na životnu okolinu, stanovništvo i druge sadržaje u prostoru. Pri tome je neophodno obezbeđenje i budućih potreba zemlje za mineralnim sirovinama, posebno energetske mineralnim sirovinama i kritičnim i strateškim mineralnim sirovinama, vodama i geotermalnom energijom, kao i širenje baze mineralnih sirovina sa povećanjem intenziteta i obima geoloških istraživanja.

Održivo upravljanje razvojem rudarstva treba da olakša i podrži pozitivne ekonomske efekte tokom cirkularnog procesa (kružnog životnog ciklusa) svakog projekta. Integrisano i nedeljivo upravljanje zahteva međudisciplinarni pristup i kontinuirano unapređenje kompetencija i sposobnosti. Zbog toga je važno jačati ulogu i kapacitete za upravljanje sektorom rudarstva u nadležnom ministarstvu, regulatornim agencijama, Geološkom zavodu, univerzitetima i institutima. Takav pristup proističe iz održivog i odgovornog društvenog, ekološkog, ekonomskog i institucionalnog razvoja.

4.1 Zelene tehnologije u rudarstvu

Rastuća potražnja za mineralima i metalima, podstaknuta tranzicijom na tehnologije obnovljive energije i digitalnu infrastrukturu, naglašava hitnost usvajanja viših standarda za ublažavanje povezanih rizika po životnu sredinu i društvo.

Uključivanje ključnih zelenih tehnologija u rudarsku opremu usklađuje se sa ciljevima održivosti, smanjuje se uticaj na životnu sredinu, i podstiče odgovorne rudarske prakse, kao što je sažeto na slici. 5. Stalni razvoj i usvajanje ovih tehnologija su od suštinskog značaja za transformaciju industrije ka održivijoj i ekološki prihvatljivijoj budućnosti. Zelene tehnologije su prepoznate kroz procese energetske efikasnosti tehnologije bušenja, veštačku inteligenciju, senzore i IoT stvari, napredne materijale i održivo rukovanje materijalima, kao i elektrifikaciji postrojenja, vozila, automatizacijom i daljinskom kontrolom, digitalizacijom, hidrogenizovanom tehnologijom i regenerativnom i biorazgradivom tehnologijom.



Slika 5. Integracija zelenih tehnologija u rudarskim operacijama

4.2 Globalni standardi održivog rudarstva

Globalni standardi odgovornog rudarstva nude okvir za rešavanje širokog spektra specifičnih pitanja, uključujući smanjenje uticaja sektora na životnu kao što su otpad, korišćenje vode i emisije. Ovi standardi imaju za cilj da poboljšaju upravljanje i transparentnost, podstičući bolje procese donošenja odluka koji mogu uključiti lokalne zajednice kako bi se osiguralo da i one imaju koristi od rudarskih operacija. Pošto postoje različiti standardi koji su specifični za temu, obim ili robu, postojanje Inicijative za konsolidaciju standarda u rudarstvu (Consolidated Mining Standard Initiative-CMSI) ima nameru da usklade više okvira u jedan standard, pojednostavljujući usklađenost, smanjujući zamor od izveštavanja i promovišući šire usvajanje u industriji.

CMSI dokument daje preporuke vladama za uspostavljanje standarda i usklađivanje razvoja standarda sa njihovim ciljevima održivosti:

1) Učešće u razvoju standarda: Vlade treba da se angažuju sa telima za uspostavljanje dobrovoljnih standarda održivosti tokom razvoja i revizije standarda, obezbeđujući da regulatorni prioriteti i izazovi se nađu od početka.

2) Jačanje propisa korišćenjem dobrovoljnih standarda: Vlade treba da koriste dobrovoljne standarde za poboljšanje nacionalnih regulatornih okvira, koristeći okvire i metrike kao modele za oblasti u kojima propisi mogu da zaostaju.

3) Promovisanje transparentnosti i deljenja podataka: Vlade treba da se zalažu za sporazume o deljenju podataka koji omogućavaju deljenje podataka o usklađenosti i nalaza revizije iz dobrovoljnih standarda sa regulatornim vlastima.

4) Usklađivanje propisa sa novim pitanjima održivosti: Vlade treba da prate nova pitanja održivosti identifikovana u dobrovoljnim standardima kako bi predvidele zahteve održivosti investitora, aktera dalje u lancu vrednosti i zemalja odredišta. Rešavanje ovih pitanja u propisima može pomoći u smanjenju rizika investicionih odluka i privlačenju stranih direktnih investicija, pozicionirajući zemlje kao sigurne, pouzdane rudarske jurisdikcije i partnere izbora.

Standardi rudarstva su okviri razvijeni da obezbede etičke, održive i transparentne prakse u rudarskom sektoru. Ovi standardi se bave pitanjima životne sredine, društva i upravljanja, kako bi pružili strukturiran pristup kompanijama da minimiziraju negativne uticaje dok se usklađuju sa najboljim globalnim praksama. Standardi rudarstva se mogu kategorisati na tri načina, tako da imaju specifični fokus. Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) predlaže opštu klasifikaciju (Tabela 1).

Tabela 1. Opšta kategorizacija rudarskih standarda

Kategorija	Fokus i opis	Primeri
Standardi dužne pažnje u lancu snabdevanja	Fokusiraju se na identifikaciju i ublažavanje rizika duž lanca snabdevanja, obezbeđujući da se minerali nabavljaju odgovorno.	Sistem sertifikacije procesa Kimberli (KPCS), LBMA Globalni kodeks plemenitih metala
Standardi učinka/ usklađenosti	Fokusiraju se na merljive performanse ili referentne vrednosti na nivou objekta, obezbeđujući da rudarske operacije ispunjavaju specifične ciljeve u vezi sa uticajem na životnu sredinu, bezbednošću radnika ili društvenom odgovornošću.	Standard Inicijative za osiguranje odgovornog rudarstva (IRMA) za odgovorno rudarstvo, Standard performansi Inicijative za upravljanje aluminijumom (ASI)
Standardi zasnovani na principima	Nude široke, fleksibilne smernice koje kompanije mogu usvojiti da vode odgovorno ponašanje. Često su nezavisni od sektora i fokusiraju se na sveobuhvatne etičke principe.	Vodeći principi UN o poslovanju i ljudskim pravima, Očekivanja učinka Međunarodnog saveta za rudarstvo i metale (ICMM)

Izvor: ISO, 2024.

Standardi rudarstva pokrivaju ključne oblasti kao što su zaštita životne sredine, upravljanje otpadom, zdravlje i bezbednost, prava radnika, društvena odgovornost, transparentnost i etičko poslovno ponašanje. Oni pružaju kompanijama strukturiran pristup rešavanju kritičnih pitanja kao što su kontrola zagađenja, očuvanje biodiverziteta i pravedne radne prakse, obezbeđujući da se operacije usklade sa globalnim ciljevima održivosti. Postavljanjem jasnih očekivanja za odgovorno ponašanje, ovi standardi vode kompanije u poboljšanju njihovih praksi i performansi i demonstriranju njihove posvećenosti održivim operacijama. U tabeli 2 navedeni su izazovi za prihvatanje koncepta „održivog rudarstva“.

Tabela 2: Izazovi u prihvatanju održivog rudarstva

Br.	Izazov	Opis problema
1	Postojeći resursi	Utvrđivanje eksploatacionih prava, širenje istraživačkih područja, korišćenje otpada na održiv način
2	Zamena tehnologija	Tehnološka rešenja, mašine, alati i transportna sredstva mogu da se zamene
3	Održivo poslovanje	Poslovni koncepti upravljanja, monitoring i kontrole procesa; uspostavljanje saradnje sa partnerima kroz joint-venture ili javno-privatno partnerstvo; ključni momenat je ulaganje sredstava u održivo poslovanje
4	Zadovoljna lokalna zajednica	Lokalne grupe, udruženja i zainteresovani pojedinci mogu biti podrška ako se poslovi obavljaju odgovorno i održivo za društvenu sredinu
5	Čista životna sredina	Početak rudarenja mora da bude zasnovano na dozvolama države, saglasnostima lokalne uprave i pristankom lokalnih udruženja, jer na kraju rudarskog ciklusa ostaju ljudi da žive u željenoj čistoj okolini

5. ZAKLJUČAK

Rudarska industrija stvara osnov za čistu proizvodnu praksu, koju prate hibridna podzemna vozila, prenosne bušotine i ekološke metode ispiranja bakra. Velike rudarske firme ulažu u tehnologije za poboljšanje bezbednosti i čistoće životne sredine, koristeći inovativne metode za smanjenje potrošnje energije i vode. Postoje naponi da se smanji kontaminacija životne sredine, kao i da se pomogne u sanaciji lokacije nakon rudarske eksploatacije. Integrisanje zelenih tehnologija u rudarske prakse označava duboku posvećenost održivosti. Industrija teži da zadovolji rastuću globalnu potražnju uz smanjenje svog ekološkog otiska, primenu električnih vozila, automatizacije i održivih praksi.

LITERATURA

- [1] Istorija srpskog rudarstva, <http://ribeograd.ac.rs/wp-content/uploads/2018/08/Istorija-Srpskog-rudarstva-cirilica-1.pdf>
- [2] Katastar rudarskog otpada, <https://kro.mre.gov.rs/kro>
- [3] Ignjatović Dragan, Pavlović Vladimir, Đenadić Stevan, Pavlović Natalija, Stanje i održivi razvoj rudarstva u Republici Srbiji, *TEHNIKA – RUDARSTVO, GEOLOGIJA I METALURGIJA* 76 (2025)-1
- [4] ISO - International Organization for Standardization. (2024). *Sustainable critical minerals supply chains* (IWA 45:2024).
- [5] M. Onifade, T. Zvarivadza, J.A. Adebisi, K.O. Saidd, O.Dayo-Oluponae, A.I. Lawalf, M. Khandelwala. Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices, *Green and Smart Mining Engineering 1* (2024) 157–174