

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Natalija V. Pavlović

**MODEL UPRAVLJANJA EKOLOŠKIM  
RIZICIMA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE  
LEŽIŠTA MINERALNIH SIROVINA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2025.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Natalija V. Pavlovic

**A MODEL FOR ENVIRONMENTAL RISK  
MANAGEMENT IN OPENCAST MINING OF  
MINERAL DEPOSITS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2025

Mentori:

---

dr Dragan Ignjatović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
Uža naučna oblast: Mehanizacija u rudarstvu i energetici

---

dr Tomislav Šubaranović, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
Uža naučna oblast: Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina

Članovi komisije:

---

dr Vladimir Čebašek, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
Uža naučna oblast: Mehanika stena

---

dr Dejan Stevanović, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet  
Uža naučna oblast: Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina

---

dr Dejan Petrović, docent  
Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru  
Uža naučna oblast: Rudarstvo i geologija

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

# MODEL UPRAVLJANJA EKOLOŠKIM RIZICIMA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE LEŽIŠTA MINERALNIH SIROVINA

## Sažetak

U ovoj disertaciji je prikazan razvoj i primena kvantitativnog modifikovanog FMECA (engl. *Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) modela za upravljanje eksternim i internim ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina, nazvanog V-FMECA (Vrednosna analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza). Pristup analizi i proceni rizika kombinuje inženjersku analizu stohastičkih rudarskih procesa, ekološki sistemski pristup i principe strukturisanog upravljanja rizicima u skladu sa usvojenim svetskim standardima. Na taj način se uspostavlja sveobuhvatan okvir za identifikaciju, procenu i ublažavanje uticaja rudarskih aktivnosti na životnu sredinu i obrnuto. S obzirom na rastuću globalnu potražnju za mineralnim resursima i neophodnosti održivog i efikasnog rudarstva, predloženi model omogućava usklađivanje ekološke i sociološke odgovornosti sa operativnom efikasnošću. Model V-FMECA unapređuje postojeće metode za procenu rizika, koje se često kritikuju zbog subjektivnog rangiranja rizika i upotrebe standardnog RPN (*Risk Priority Number*) broja. Uvođenjem objektivnije i kvantitativno zasnovane vrednosti prioriteta rizika (RPV) preko proračunate verovatnoće i sadašnje vrednosti mogućih posledica pojave otkaza ekosistema, model povećava transparentnost i doslednost u donošenju odluka. Zasniva se na teoriji pouzdanosti i procesnoj inženjerskoj proceni rizika, dok zadržava jednostavnost i praktičnost tradicionalnih kvalitativnih metoda. Njegova prilagodljivost različitim geološkim, klimatskim i ekološkim uslovima čini ga široko primenljivim u svim rudarskim scenarijima i pri pojavi svih mogućnosti otkaza u ekosistemu. Takođe, model uključuje i ekonomsku evaluaciju, čime se olakšava opravdanje ulaganja u zaštitu životne sredine preko preventivnih mera i jača komunikacija sa regulatornim telima, lokalnim zajednicama i drugim zainteresovanim stranama. Model je verifikovan kroz četiri studije slučaja u okviru površinske eksploatacije lignita u Srbiji: revitalizacije rudarske opreme na površinskom kopu Tamnava-Zapadnom polje, otkaza generalne kosine na površinskom kopu Polje E, rizicima rehabilitacije odlagališta u Kostolačkom basenu uglja i analize površinskog odvodnjavanja na kopu Drmno u odnosu na globalne klimatske promene. U svakom od slučajeva, V-FMECA je omogućila precizno prepoznavanje i analizu ključnih rizika, što je dovelo do smanjenja ukupnog ekološkog rizika i poboljšanja pouzdanosti rudarskog sistema. Model je pokazao sposobnost dinamičke adaptacije na promene uslova slučajnog procesa rada rudnika sa mnogobrojnim uticajima u realnom vremenu. Ovo istraživanje podržava napredak ka odgovornom rudarstvu promovišući kulturu ekološke, sociološke i ekonomske odgovornosti, stalnog unapređenja upravljanja i integracije principa stabilne održivosti u srž planiranja i realizacije rudarskih projekata.

**Ključne reči:** površinska eksploatacija, upravljanje rizicima, ekološki rizici, FMECA, pouzdanost.

**Naučna oblast:** Rudarsko inženjerstvo

**Uža naučna oblast:** Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina

**UDK broj:** 574:005.334(043.3)

622.3

# A MODEL FOR ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT IN OPENCAST MINING OF MINERAL DEPOSITS

## Abstract

This dissertation presents the development and application of a modified FMECA (*Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) model for managing internal and external environmental risks in opencast mining of mineral resources, called V-FMECA (Value-Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis). The approach to analysis and risk assessment combines engineering analysis of stochastic mining processes, an ecological systems approach, and the principles of structured risk management in accordance with adopted global standards. In this way, a comprehensive framework is established for identifying, assessing, and mitigating the impacts of mining activities on the environment, and vice versa. Considering the growing global demand for mineral resources and the necessity of sustainable and efficient mining, the proposed model enables the alignment of environmental and social responsibility with operational efficiency. The V-FMECA model enhances existing risk assessment methods, which are often criticized for their subjective risk ranking and reliance on standard RPN (*Risk Priority Number*) values. By introducing a more objective and quantitatively based RPV (*Risk Priority Value*), calculated using probability and present value of possible consequences upon potential ecosystem failure, the model improves transparency and consistency in decision-making. It is based on reliability theory and process engineering risk assessment, while preserving the simplicity and practicality of traditional methods. Its adaptability to various geological, climatic, and ecological conditions makes it widely applicable to all mining scenarios and potential failure modes within the ecosystem. Furthermore, the model includes an economic evaluation component, facilitating the justification of environmental protection investments through preventive measures and strengthening communication with regulatory bodies, local communities, and other stakeholders. The model was validated through four case studies involving opencast lignite mining in Serbia: revitalization of mining equipment at the opencast mine Tamnava-Western Field, slope failure at opencast mine Field E, rehabilitation risks of waste dumps in the Kostolac coal basin, and surface dewatering analysis at the opencast mine Drmno related to climate change. In each of these cases, V-FMECA enabled precise identification and analysis of key risks, leading to a reduction in overall environmental risk and improvement in the reliability of the mining system. The model demonstrated its ability to dynamically adapt to changing mine operating conditions with numerous real-time influences. This research supports the advancement toward responsible mining by promoting a culture of environmental, social and economic accountability, continuous improvement in management, and the integration of sustainable development principles into the core of mining project planning and implementation.

**Keywords:** opencast mining, risk management, environmental risks, FMECA, reliability.

**Scientific field:** Mining engineering

**Scientific subfield:** Opencast mining

**UDK number:** 574:005.334(043.3)

622.3

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2. OSNOVNE HIPOTEZE .....	2
1.3. NAUČNE METODE I OČEKIVANI DOPRINOS .....	2
1.4. STRUKTURA DISERTACIJE .....	3
<b>2. PREGLED ISTRAŽIVANJA U OBLASTI RIZIKA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE</b> ....	<b>4</b>
2.1. DEFINICIJA RIZIKA .....	4
2.1.1. Standardi i zakonodavni okvir u oblasti upravljanja rizicima .....	5
2.2. VRSTE RIZIKA PRI POVRŠINSKOJ EKSPLOATACIJI .....	7
2.2.1. Rizici neizvesnosti rezultata geoloških istraživanja - Geološki rizici .....	10
2.2.2. Loša procena investicija .....	12
2.2.3. Tehnički rizici .....	15
2.2.4. Bezbednost i zdravlje na radu .....	16
2.2.5. Ekološki rizici .....	19
2.2.5.1. Uticaji na vodu .....	24
2.2.5.2. Uticaji na vazduh .....	25
2.2.5.3. Uticaji na tlo .....	26
2.2.5.4. Uticaji na životinjski i biljni svet .....	28
2.2.5.5. Uticaji na ljude .....	28
2.2.6. Socijalni rizici .....	28
2.2.7. Rizici klimatskih promena .....	32
2.2.8. Rizici zastoja i prekida proizvodnje .....	34
2.2.9. Rizici zatvaranja rudnika .....	35
2.2.10. Zakonski rizici .....	37
2.2.11. Finansijski rizici .....	37
<b>3. UPRAVLJANJE RIZICIMA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA</b> .....	<b>39</b>
3.1. PROCENA RIZIKA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA .....	43
3.1.1. Kvalitativna analiza rizika .....	46
3.1.2. Kvantitativna analiza rizika .....	47
3.1.2.1. RCM - Održavanje usredsređeno na pouzdanost .....	48
3.1.2.2. Markovljeva analiza .....	50
3.1.2.3. FMEA - Analiza režima i efekata otkaza .....	50
3.1.2.3.1. FMECA - Analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza .....	52
<b>4. ANALIZA EKOLOŠKIH RIZIKA U POVRŠINSKOJ EKSPLOATACIJI MODIFIKOVANOM METODOM</b> .....	<b>55</b>
4.1. PROCENA RIZIKA MODIFIKOVANOM KVANTITATIVNOM V-FMECA METODOM .....	58
4.1.1. Identifikacija rizika .....	62
4.1.2. Analiza rizika .....	62
4.2. PROCENA VEROVATNOĆE OTKAZA, POSLEDICA I EKOLOŠKIH RIZIKA MODIFIKOVANOM METODOM .....	65
4.2.1. Procena verovatnoće otkaza ekosistema površinske eksploatacije .....	66
4.2.2. Procena očekivanih posledica otkaza ekosistema površinske eksploatacije .....	71
4.2.3. Dopušteni ekološki rizik površinske eksploatacije .....	71
<b>5. ANALIZA SPECIFIČNIH SLUČAJEVA I VERIFIKACIJA MODELA</b> .....	<b>73</b>
5.1. PROCENA RIZIKA POPLAVLJENE OPREME NA POVRŠINSKOM KOPU TAMNAVA-ZAPADNO POLJE .....	73
5.1.1. Identifikacija rizika potopljene opreme na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje	74
5.1.2. Verovatnoće rizika .....	75
5.1.3. Investicije u opremu na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje .....	77
5.1.4. Kvantitativna analiza rizika poplavljenog kopa .....	79
5.1.5. Rezultati analize rizika .....	80

5.2. ANALIZA RIZIKA OTKAZA GENERALNE KOSINE NA POVRŠINSKOM KOPU POLJE E .....	81
5.3. RIZICI REHABILITACIJE ODLAGALIŠTA KOSTOLAČKOG BASENA UGLJA .....	85
5.3.1. <i>Analiza rizika i model eko-kontrole</i> .....	86
5.3.2. <i>Primeri rehabilitacije unutrašnjih i spoljašnjih odlagališta u Kostolačkom basenu</i> .....	87
5.3.2.1. Rehabilitacija i rekultivacija spoljašnjih odlagališta površinskog kopa Klenovnik .	87
5.3.2.2. Rehabilitacija i rekultivacija spoljašnjih odlagališta površinskog kopa Ćirikovac ..	88
5.3.2.3. Realizacija rehabilitacije i rekultivacije spoljašnjeg i unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Drmno .....	89
5.4. PROCENA EKOLOŠKIH RIZIKA POVRŠINSKOG ODVODNJAVANJA NA POVRŠINSKOM KOPU DRMNO .....	89
5.4.1. <i>Prirodna, tehnička i strukturna analiza sistema površinskog odvodnjavanja</i> .....	90
5.4.2. <i>Pouzdanost sistema površinskog odvodnjavanja i evaluacija prihvatljivog rizika</i> .....	90
5.4.3. <i>Evaluacija rizika sistema površinskog odvodnjavanja</i> .....	91
5.4.4. <i>Optimizacija rizika ekosistema površinskog kopa Drmno</i> .....	92
<b>6. DISKUSIJA I INTERPRETACIJA REZULTATA .....</b>	<b>95</b>
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>97</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>99</b>

## Spisak slika

- Slika 2.2.1. Osnovni prisutni rizici u rudarstvu
- Slika 2.2.2. Faze razvoja površinskog kopa i njihov odnos sa rizicima
- Slika 2.2.1.1. Izvori neizvesnosti u procesu sticanja geološkog znanja
- Slika 2.2.2.1. Odnos zahvaćenosti mineralne sirovine i otkrivke na površinskom kopu i dinamike napredovanja
- Slika 2.2.2.2. Metodologija procene isplativosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina
- Slika 2.2.4.1. Nesreće sa smrtnim ishodom i nesreće na radu prema NACE sekciji, EU, 2022 (% nesreća sa smrtnim i bez smrtnog ishoda)
- Slika 2.2.5.1. Uzročno-posledične veze u ekologiji
- Slika 2.2.5.2. Prikaz promena ekoloških uslova ekosistema u odnosu na vreme površinske eksploatacije u svim fazama razvoja
- Slika 2.2.5.3. Ekološki uticaji površinske eksploatacije
- Slika 2.2.5.4. Iterativni postupak vrednovanja nivoa negativnog uticaja uzroka i ekološke osetljivosti
- Slika 2.2.5.3.1. Pravilno integralno planiranje rehabilitacije sa rekultivacijom tokom životnog veka površinskog kopa
- Slika 2.2.6.1. Tri tipa poslovnih rizika uzrokovanih socijalnim aspektima koji su specifični za rudarstvo
- Slika 2.2.7.1. Prikaz uticaja rizika klimatskih promena na finansije
- Slika 2.2.11.1. Trajanje aktivnosti u životnom ciklusu projekta površinske eksploatacije
- Slika 3.1. Prikaz modela upravljanja rizicima
- Slika 3.2. Model (principi, okvir, proces) upravljanja rizicima po standardu ISO 31000:2018
- Slika 3.1.1. Podela tehnika/metoda za vrednovanje rizika
- Slika 3.1.2.3.1.1. Usklađenost FMECA procesnog modela sa ISO 31000:2018 procesnim modelom upravljanja rizicima
- Slika 4.1. Struktura povezanosti prirodno-tehničkog ekosistema površinske eksploatacije
- Slika 4.2. Poplavljen površinski kop Tamnava - Zapadno polje (2014. godina)
- Slika 4.3. Klizište na površinskom kopu Polje E (2024. godina)
- Slika 4.1.1. Usklađenost modifikovane V-FMECA i FMECA metoda procene rizika
- Slika 4.1.2. Procesni model upravljanja ekološkim rizicima baziran na modifikovanoj V-FMECA metodi
- Slika 4.1.2.1. Matematički prikaz modela upravljanja ekološkim rizicima površinske eksploatacije baziranog na modifikovanoj V-FMECA metodi
- Slika 4.2.1.1. Verovatnoća ispravnog funkcionisanja ekosistema bez i sa preventivnim aktivnostima
- Slika 4.2.1.2. Lanac stanja fazne realizacije projekta
- Slika 5.1.1. Poplavljen površinski kop Tamnava-Zapadno polje
- Slika 5.1.1.1. Potopljeni bageri na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje
- Slika 5.1.1.2. Delimično potopljen rotorni bager na otkopavanju otkrivke
- Slika 5.1.2.1. Verovatnoće rada i otkaza tehničkih ( $P_{o1}$ ,  $P_{f1}$ ), kontrolisanih ( $P_{o2}$ ,  $P_{f2}$ ) i nekontrolisanih ( $P_{o3}$ ,  $P_{f3}$ ) elemenata životne sredine u serijskoj sistemskoj vezi
- Slika 5.2.1. Rezultat narušene stabilnosti kosine na površinskom kopu Polje E
- Slika 5.2.2. Proračun stabilnosti kosine sa koeficijentom pornog pritiska od 0,2 i uglom nagiba od  $9^\circ$  pre loma kosine sa faktorom sigurnosti 0,9
- Slika 5.2.3. Proračun stabilnosti nagiba generalne kosine nakon izgradnje nasipa kada je faktor sigurnosti 1,3, sa koef. pornog pritiska od 0,3
- Slika 5.2.4. Proračun stabilnosti nagiba generalne kosine pri budućoj eksploataciji pod uglom nagiba od  $8^\circ$ , sa faktorom sigurnosti 1,5, sa koef. pornog pritiska od 0,3
- Slika 5.3.1.1. Prikaz stanja rekultivacije

- Slika 5.4.4.1. Izgled glavnog vodosabirnika sa taložnikom i pumpnom stanicom na površinskom koku Drmno
- Slika 5.4.4.2. Primer procene rizika sistema površinskog odvodnjavanja površinskog kopa (Početno stanje sistema, I iteracija, II iteracija)

## Spisak tabela

Tabela 2.1.1.	Osnovni međunarodni standardi za upravljanje rizicima
Tabela 2.2.4.1.	Fatalni ishodi u površinskoj i podzemnoj eksploataciji od 2006. do 2010. godine
Tabela 2.2.5.1.	Osnovni međunarodni standardi za vrednovanje ekoloških uticaja
Tabela 2.2.6.1.	Primeri dobrog postupanja prema zajednici
Tabela 3.1.	Odabrani relevantni međunarodni standardi za upravljanje rizicima
Tabela 3.1.1.	Primenljivost alata koji se koriste za procenu rizika
Tabela 3.1.1.1.	Tradicionalna matrica za procenu rizika
Tabela 3.1.2.3.1.	Procesne aktivnosti FMEA postupka
Tabela 4.1.	Prikaz kontrolisanih i nekontrolisanih uticaja površinske eksploatacije
Tabela 4.1.1.1.	Primer sagledavanja opasnosti od poplava i njihovih posledica na površinskom kopu
Tabela 4.2.1.	Ključne razlike konvencionalne FMECA i modifikovane V-FMECA metode procene rizika
Tabela 5.1.3.1.	Investicioni troškovi za sve opcije
Tabela 5.1.3.2.	Iznosi investicija za osnovnu opremu
Tabela 5.1.3.3.	Vreme potrebno za revitalizaciju opreme
Tabela 5.1.4.1.	Parametri i analiza tehničkih i ekoloških rizika za Opciju 1
Tabela 5.1.4.2.	Parametri i analiza tehničkih i ekoloških rizika za Opciju 2
Tabela 5.1.4.3.	Parametri i analiza tehničkih i ekoloških rizika za Opciju 3
Tabela 5.1.5.1.	Kvantitativna procena rizika i sadašnja vrednost gubitaka različitih opcija revitalizacije
Tabela 5.1.5.2.	Rangiranje procenjenih opcija po TOPSISu
Tabela 5.2.1.	Procenjene posledice kao troškovi i gubici po uzrocima otkaza (u milionima eura)
Tabela 5.2.2.	Analiza rizika i rangiranje po uzrocima kvara bez preventivnih aktivnosti (početni rizik)
Tabela 5.2.3.	Analiza rizika i rangiranje po uzrocima kvara sa uspešnim preventivnim aktivnostima
Tabela 5.2.4.	Raspodela po prioritetima, intervalima rizika i opisu vrednosti rizika (M€)
Tabela 5.3.1.1.	Matrica rizika
Tabela 5.3.2.1.1.	Verovatnoće planiranih uslova rekultivacije na spoljašnjim odlagalištima površinskog kopa Klenovnik
Tabela 5.3.2.2.1.	Verovatnoće planiranih uslova rekultivacije na spoljašnjim odlagalištima površinskog kopa Ćirikovac
Tabela 5.4.3.1.	Ukupni godišnji investicioni troškovi sistema površinskog odvodnjavanja, njihov linearni rast sa periodom povrata od 30 godina i verovatnoće otkaza i rizici sa posledicama od 7,6 miliona eura

## 1. UVOD

Površinski kopovi predstavljaju kompleksne sisteme koji se sastoje iz skupa tehnoloških rudarskih procesa međusobno zavisnih i povezanih tokom svih faza razvoja površinske eksploatacije u promenljivoj radnoj sredini u vremenu i prostoru. Uzimajući u obzir međusobnu povezanost svih rudarskih procesa u sistemu svakog površinskog kopa, postaje od izuzetne važnosti da ni u jednom od procesa ne dođe do otkaza, jer bi to dovelo do zastoja ili otkaza funkcionisanja odgovarajućeg sistema i ugrožavanja proizvodnje i životne sredine. Rizik predstavlja mogućnost da se desi bilo kakav otkaz u delu sistema, i samim tim manifestuje pretnju po funkcionalnost površinskog kopa.

Rizici su prisutni pre eksploatacije, tokom eksploatacije i nakon eksploatacije ležišta mineralnih sirovina pri procesu zatvaranju i rehabilitacije prostora površinskog kopa. Neosporan značaj eksploatacije mineralnih sirovina za svakodnevni život, privredu i energetska stabilnost zahteva neometano i održivo rudarstvo, pa je od izuzetnog značaja da ne dođe do prekida snabdevanja istih, kako sa poslovnog aspekta, tako i sa gledišta osnovnih ljudskih potreba.

Ekološki rizici su u velikoj meri značajni za rad površinskog kopa, i samim tim njihovo eliminisanje ili umanjenje i kontrolisanje nije samo moralna i etička odgovornost, već je i od suštinskog značaja za obezbeđivanje dugoročne održivosti rudarskih operacija i dobrobiti ekosistema i zajednica. Da bi rudarstvo bilo održivo, potrebno je u najvećoj meri i detaljno identifikovati sve ekološke rizike jednog rudarskog projekta i rada rudnika. Zatim je neophodno preduzeti ekonomske mere za smanjenje rizika na osnovu smanjenja verovatnoće otkaza i posledica negativnih uticaja eksploatacije, što je ujedno i tema ove disertacije, kada se radi o ekološkim rizicima na površinskim kopovima ležišta mineralnih sirovina, koji su u funkciji mnogih eksploatacionih internih ali i eksternih faktora.

U cilju efikasnog upravljanja rizicima i obezbeđenja kontinuiteta proizvodnje, neophodno je primeniti savremene metode identifikacije, analize i evaluacije rizika koje omogućavaju blagovremeno prepoznavanje potencijalnih opasnosti i donošenje optimalnih odluka u pogledu preventivnih i korektivnih mera. U tom kontekstu, metode procene rizika omogućavaju kvantitativnu procenu rizika na osnovu verovatnoće nastanka otkaza, značaja posledica i otkrivanja problema. Na taj način, rizici se ne posmatraju izolovano, već u međusobnoj povezanosti i zavisnosti unutar sistema, čime se obezbeđuje realističnija slika ukupne ugroženosti rudarskih procesa u sistemu.

Jedan od važnih aspekata jeste integracija procene rizika u sve faze razvoja rudarskog projekta, od početnih istraživanja i planiranja, preko aktivne faze eksploatacije, pa sve do zatvaranja i rehabilitacije prostora. Time se obezbeđuje ne samo tehnička i ekonomska efikasnost, već i odgovorno upravljanje prirodnim resursima u skladu sa principima održivog razvoja. U svetlu klimatskih promena i rastućih ekoloških zahteva, ovakav pristup postaje neizostavan deo savremenog rudarstva i preduslov za očuvanje konkurentnosti i prihvatanja rudarskih projekata od strane lokalnih zajednica i šire javnosti.

### 1.1. Predmet i cilj istraživanja

Predmet ove doktorske disertacije je razvoj i primena modela za upravljanje ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina. Istraživanje se fokusira na identifikaciju, kvantifikaciju i evaluaciju uticaja rudarskih aktivnosti na životnu sredinu, kao i spoljnih uticaja na rudarske aktivnosti, sa posebnim naglaskom na integraciju savremenih tehničko-tehnoloških i metodoloških alata za predikciju i ublažavanje rizika u okviru jednog sistematičnog i jednostavno primenljivog modela.

Cilj disertacije je razvoj sveobuhvatnog modela koji omogućava pravovremeno prepoznavanje i efikasno upravljanje ekološkim rizicima tokom celokupnog životnog ciklusa površinskog kopa. Model je prilagodljiv različitim rudarskim uslovima, omogućava donošenje odluka zasnovanih na analizi podataka i proceni rizika, i podržava implementaciju dobrih rudarskih praksi koje minimizuju negativne uticaje na životnu sredinu i obrnuto, uz očuvanje efikasnosti i sigurne održivosti eksploatacije.

Predmet i cilj istraživanja ove doktorske disertacije biće razrađen kroz nekoliko faza:

- Analiza relevantne literature, klasifikacija i selekcija odabranih literaturnih izvora, prikaz dosadašnjih saznanja iz oblasti pouzdanosti i inženjerstva tehničkih sistema;
- Prikupljanje, selekcija, statistička obrada i analiza dobijenih (prikupljenih) podataka vezanih za zastoje i otkaze sistema za površinsku eksploataciju i njihovih posledica.
- Analitička obrada dobijenih rezultata. Primena teorije verovatnoće i modela višekriterijumskog odlučivanja, interpretacija rezultata istraživanja, diskusija i zaključci.
- Razvoj modela upravljanja ekološkim rizicima na osnovu dobijenih rezultata analize i predikcije.

U posebnim poglavljima doktorske disertacije data su uvodna razmatranja, teorijske postavke problema, analitički deo, studiju slučaja i zaključna razmatranja.

## **1.2. Osnovne hipoteze**

Istraživanje u okviru ove disertacije zasniva se na nekoliko osnovnih polaznih postavki i stavova koje treba dokazati i verifikovati.

Savremeni zahtevi održivog razvoja nameću potrebu za odgovornim i efikasnim upravljanjem prirodnim resursima, što podrazumeva identifikaciju, analizu i minimizaciju negativnih uticaja rudarskih aktivnosti na životnu sredinu. Ekološki rizici, ukoliko se ne identifikuju i ne kontrolišu blagovremeno, mogu dovesti do ozbiljnih posledica po ekosisteme, lokalne zajednice i samu eksploataciju ležišta mineralnih sirovina. Iz tog razloga, neophodno je razviti i primeniti systemske i pouzdane metode za procenu i upravljanje ovim rizicima u svim fazama razvoja rudarskog projekta.

Mnogobrojni ekološki rizici značajno utiču na povećanje visokih troškova i investicija koji su nerazdvojni prateći elementi savremenog rudarstva. Zaštiti životne sredine i ekološkim rizicima se posvećuje sve veća pažnja u cilju dostizanja odgovornog i održivog rudarstva. Međutim, svi rizici površinske eksploatacije su povezani i trebalo bi da se posmatraju kao jedna celina u odnosu na ekološke, socijalne i ekonomske komponente održivog razvoja. Optimizacija ekoloških rizika smanjila bi ukupnu verovatnoću i ekonomske posledice ekoloških otkaza zbog internih i eksternih uzroka u rudarstvu, a time uklonila ili značajno umanjila negativne uticaje po životnu sredinu, sigurnost i stabilnost proizvodnje površinskih kopova.

Takođe, optimizacija ekoloških rizika bi doprinela ekonomičnijem pristupu investiranju u preventivne mere zaštite životne sredine u rudarstvu.

Podaci dobijeni iz ovog istraživanja treba da budu dobra osnova za prikazivanje i poređenje različitih akcija i pristupa smanjenju rizika, odnosno verovatnoća ekoloških otkaza i posledica, a ujedno da pruže uvid u moguće načine unapređenja odgovorne ekološke prakse u rudarstvu.

## **1.3. Naučne metode i očekivani doprinos**

Problematika upravljanja ekološkim rizicima pri površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina, obrađena u doktorskoj disertaciji, realizuje se kroz tri faze, i to:

- 1) Teorijska analiza: odnosi se na proučavanje dosadašnjih teorijskih saznanja i novih rezultata vezanih za interne i eksterne ekološke rizike eksploatacije.
- 2) Prikupljanje podataka: ova faza istraživanja obuhvata prikupljanje i proučavanje literaturnih podataka i serije usvojenih standarda vezanih za datu problematiku, analizu i sistematizaciju istih.
- 3) Obrada i analiza podataka: obuhvata prikaz rezultata dobijenih terenskim ispitivanjem uzroka i posledica negativnih uticaja na životnu sredinu, zatim utvrđivanje svih ekoloških rizika po uzrocima i njihovo rangiranje po prioritetima. Rezultat bi se ogledao u razvijanju i verifikaciji novog procesnog matematičko-ekonomskog modela za podršku pri odlučivanju o upravljanju ekološkim rizicima.

Izradom predložene doktorske disertacije očekuju se sledeći naučni doprinosi:

- Svestrana analiza dostignuća, sistematizacija saznanja i kritički osvrt na istraživanja u oblasti ekoloških rizika na površinskim kopovima;
- Razvoj modela za kvantitativnu analizu ekoloških rizika, procena i odabir optimalne mere za smanjenje verovatnoće pojave otkaza i negativnih posledica, što će takođe pomoći ekonomičnijem održivom radu površinskog kopa sa što manjim gubicima u proizvodnji.

Rezultati navedenih teoretskih analiza i dobre prakse su verifikovani na primerima različitih površinskih kopova uglja. Pri tome je veoma važno napomenuti da je definisani model fleksibilan i adaptivan, tako da se može koristiti i na drugim rudnicima i tehničkim sistemima.

#### 1.4. Struktura disertacije

Struktura ove disertacije obuhvata šest tematskih celina, odnosno poglavlja, kroz koja se tematski i metodološki razrađuje problematika upravljanja ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina.

Doktorsku disertaciju, pored opštih sastavnih elemenata, kao što su rezime na srpskom i engleskom jeziku, ključne reči, predgovor, sadržaj, spisak slika, tabela i literature, čine i sledeće strukturne celine:

1. Uvod
2. Pregled istraživanja u oblasti rizika površinske eksploatacije
3. Upravljanje rizicima na površinskim kopovima
4. Analiza ekoloških rizika u površinskoj eksploataciji modifikovanom metodom
5. Analiza specifičnih slučajeva i verifikacija modela
6. Diskusija i interpretacija rezultata
7. Zaključak

U poglavlju 1, opisan je predmet istraživanja, definisana je problematika vezana za ozbiljnost rizika u održivom rudarstvu i upravljanje ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina i postavljeni su ciljevi doktorske disertacije uz kratak opis primenjenih naučnih metoda tokom izrade doktorske disertacije.

Poglavlje 2 sadrži prikaz teorijske osnove prisutnih rizika u rudarstvu, odnosno pregled relevantne literature i usvojenih standarda, definicija i klasifikacija rizika, generalna svetska iskustva sa rizicima u rudarstvu i podela rizika u rudarstvu.

U poglavlju 3 je detaljnije prikazana problematika upravljanja rizicima, i opisane svetski priznate metode za procenu rizika.

Poglavlje 4 postavlja i objašnjava metodološki okvir modifikovane V-FMECA metode, sadrži precizan opis koncepta, matematičke osnove i prilagođavanja metode za potrebe procene ekoloških rizika u površinskoj eksploataciji.

Poglavlje 5 je posvećeno primerima primene metode postavljene u ovoj disertaciji kroz četiri studije slučaja.

U poglavlju 6 je kratka diskusija i interpretacija rezultata, poređenje sa postojećim metodama i prednosti i ograničenja V-FMECA metode.

Poslednje poglavlje 7 sadrži sumirane zaključke istraživanja, doprinos disertacije nauci i praksi, kao i predloge za buduća istraživanja.

Doktorska disertacija se završava spiskom korišćene literature i kraćom biografijom autora.

## 2. PREGLED ISTRAŽIVANJA U OBLASTI RIZIKA POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE

Površinski kopovi ležišta mineralnih sirovina su karakteristični rudarski objekti gde se razvoj eksploatacije realizuje postepeno u okviru projektovanih kontura od površine terena do planirane dubine. Zbog mnoštva ozbiljnih rudarskih radova u trodimenzionalnom prostoru, geološke neizvesnosti, nepredvidivih vremenskih uslova i najčešće ljudskih grešaka, rad na površinskim kopovima je kompleksan i stalno se transformiše u prostoru i vremenu. Dodatno, stalni zavisni eksponencijalni rast svetske populacije i eksploatacije mineralnih sirovina je ubrzan i zbog zacrtane energetske tranzicije i potreba za kritičnim mineralima, dovodi do pojava sve većih ekoloških, socijalnih i ekonomskih problema. Zbog toga je održivost postala osnovni princip upravljanja radom površinskih kopova i pratećim rizicima. Tako dinamičan način rada sa puno internih i eksternih uticajnih faktora automatski znači da je neometana održiva eksploatacija ležišta mineralnih sirovina izložena sve većem broju rizika.

Kao što je ranije napomenuto, rizici su opšteprisutni pre, tokom i nakon eksploatacije ležišta mineralnih sirovina jer je rudarstvo skup složenih fizičko-mehaničkih radnji velikog obima i sa značajnim ekološkim uticajima. Pažljiva analiza rizika i njihovih posledica je neophodna za svaki veliki projekat, kako u rudarstvu tako i van rudarstva. U ovom poglavlju su detaljnije objašnjeni mogući rizici u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, kao i neophodnost njihove ozbiljne procene.

### 2.1. Definicija rizika

Rizik se može definisati kao verovatnoća događaja koji može imati štetne posledice ili ishode. U različitim kontekstima, kao što su finansije, posao, zdravlje i svakodnevni život, rizik predstavlja neizvesnost i potencijal za gubitak povezan sa određenom radnjom, odlukom ili situacijom.

Kao primer, u međunarodnom standardu ISO:31000:2018, rizik je definisan kao *efekat neizvesnosti na ciljeve*. Pod efektom se podrazumeva odstupanje od očekivanog, koji može biti negativan, pozitivan ili kombinacija oba [1]. Ova opšteprihvaćena definicija nalazi svoju primenu u svim poslovnim procesima i industrijama, uključujući rudarstvo. Druge opšte kvalitativne definicije rizika su [2]:

- a) mogućnost nesrećnog događaja,
- b) potencijal za stvaranje neželjenih, negativnih posledica nekog događaja,
- c) izloženost neizvesnom predlogu (npr. gubitak),
- d) posledice aktivnosti i povezane neizvesnosti,
- e) neizvesnost i ozbiljnost posledica neke aktivnosti u odnosu na nešto što je cenjeno,
- f) pojave nekih specificiranih posledica aktivnosti i povezane neizvesnosti,
- g) odstupanje od referentne vrednosti i povezane nesigurnosti.

Neizvesnost i rizici pri donošenju odluka su svojstveni svakom aspektu poslovanja, nevezano za to da li će odluka imati dugoročne ili kratkoročne posledice. Bilo da je u pitanju plasman novog proizvoda, otvaranje ili zatvaranje površinskog kopa, uvođenje novog procesa ili nove tehnologije, kupovini kompanije, izgradnji nove fabrike ili uspostavljanju politike ili propisa koji utiču na menadžment, lideri i menadžeri moraju proceniti ne samo potencijalne koristi od ovih aktivnosti, već i rizike povezane sa njima [3]. Negativne ekološke, poslovne i finansijske posledice stvaraju potrebu za ozbiljnim i detaljnim procenama mogućih rizika u posmatranoj grani poslovanja. Relevantno je koji rizici su prisutni, koja je verovatnoća da se pomenuti rizici dogode i koje su moguće posledice. Dakle, rizici se operativno mogu prikazati kao skup koji se sastoji od sledećih elemenata [4]:

- Scenarija koji dovode do pogoršanja performansi u odnosu na jednu ili više mera učinka (npr. scenariji koji dovode do povreda, smrtnih slučajeva, uništenja ključnih sredstava; scenarija koji dovode do prekoračenja određenih ograničenja; scenarija koji dovode do prekoračenja troškova; scenarija koji dovode do promena u rasporedu ili kašnjenja),
- Verovatnoće (kvalitativna ili kvantitativna) tih scenarija,

- Posledice (kvalitativna ili kvantitativna ozbiljnost degradacije performansi) koje bi nastale ako bi se ti scenariji desili.

Definisanje rizika na ovaj način ide u prilog njihovom upravljanju, zato što omogućava razlikovanje ishoda sa velikom verovatnoćom i malim posledicama, i ishoda sa malom verovatnoćom i velikim posledicama. Ovakvo definisanje takođe ukazuje na prostor u kom bi bilo opravdano dalje ulaganje radi smanjenja neizvesnosti nekog scenarija ili događaja [4].

Utvrđeno je da kada se procenjuju i vrednuju različiti rizici, mogu postojati značajne varijacije u nivou znanja, pristupu podacima, kredibilitetu pretpostavki i tome koliko dobro analitičari razumeju konkretnu situaciju (npr. kroz modeliranje) [5]. Informacije o takvim neizvesnostima mogu biti od vitalnog značaja u procesima donošenja odluka [6], i stoga ih treba razmatrati pri upravljanju rizicima. Verovatnoća predstavlja alat za bliže definisanje neizvesnosti [7][8][9], i od izuzetnog je značaja kad su u pitanju procene rizika. Ukoliko se verovatnoća određenog događaja svede na vrednost najbližu realnim vrednostima, procena rizika će biti preciznija, što će direktno uticati na kvalitetno upravljanje rizikom.

Za sve poslovne organizacije, a posebno rudarske, koje egzistiraju u uslovima turbulentnog okruženja i uslovima značajnih rizika, kako poslovnih tako i tehnoloških i prirodnih, suštinski je značajno da procene i kontrolišu rizike kojima su izložene i na koji način ti rizici utiču na ostvarivanje njihovih poslovnih ciljeva. Rudarske organizacije, kako u administrativnom tako i u tehničko-tehnološkom domenu poslovanja, moraju da prepoznaju mnoge interne i eksterne rizike, da bi mogle njima da upravljaju. Prihvatajući holistički pristup riziku i upravljanju rizikom, organizacije preuzimaju kontrolu nad neočekivanim događajima koji mogu da izazovu ekološke probleme, finansijske gubitke, prekid normalnog poslovanja, narušavanje reputacije i/ili konkurentnost.

Nivo rizika površinske eksploatacije je izuzetno promenljiv tokom vremena jer se sve stohastičke procesne aktivnosti odvijaju u uslovima veće ili manje entropije. Zbog nekog uzroka, procenjeni prihvatljivi rizik eksploatacije može da poprimi neprihvatljivi nivo. To ima za posledicu potrebu stalnog sprovođenja kontrole rizika i aktivnosti održavanja rizika na prihvatljivom nivou i prema prirodi problema u okviru postavljenog kompleksnog poslovnog procesa u celini.

### **2.1.1. Standardi i zakonodavni okvir u oblasti upravljanja rizicima**

Za proces upravljanja rizicima postoje različiti međunarodni standardi koji se sve više primenjuju u velikom broju organizacija, pa i rudarskih, uz mnoge različite pristupe i definicije upravljanja rizicima. Prvi nacionalni standard se pojavio u Australiji i Novom Zelandu 1995. godine, a zatim u Kanadi 1997. godine i u Velikoj Britaniji 2000. godine. I ostale regije su postepeno razvijale slične postupke standardizovanog pristupa upravljanju rizicima. Tako je američki standard COSO ERM objavljen 2004. godine, a ubrzo nakon objavljivanja postao primarni standard za upravljanje rizicima u kompanijama (engl. *Enterprise Risk Management* - ERM). I druge zemlje, kao što su Evropska unija ili Kina, su takođe imale potrebu za razvijanjem sistema i standarda u skladu sa svojim pogledom na poslovanje kako na nacionalnom, tako i na međunarodnom nivou. Među najčešće korišćenim evropskim standardima su BS (engl. *British Standards*) i ISO (engl. *International Organization for Standardization*), koji obuhvata veliki broj oblasti primene i čiji principi su usvojeni i u Republici Srbiji. Skraćenica ISO/IEC predstavlja objedinjeni ISO i IEC (engl. *International Electrotechnical Commission*) standard upravljanja rizicima. Sa generalnog aspekta izuzetno je važan i sistem standarda upravljanja životnom sredinom ISO 14000 (engl. *Environmental management systems* - EMS) sa obavezom utvrđivanja rizičnosti ekološkog funkcionisanja kompanija.

U oblasti rizika za rudarstvo se koriste i tipični standardi koji obuhvataju najbolju međunarodnu praksu (engl. *International Best Practice* - IBP), uključujući standarde Internacionalne finansijske korporacije (engl. *International Finance Corporation* - IFC), Ekvatorskih principa (engl. *Equator Principles*), standarde Evropske banke za razvoj (engl. *European Bank for Reconstruction Development* - EBRD) i Svetske banke (engl. *World Bank*), kao i specifične priručnike najbolje prakse navedenih banaka i Evropske unije (engl. *European Union Best Available Techniques* - BAT) sa referentnim dokumentima (engl. *Reference Documents* - BREFs). Tako je karakterističan i

Priručnik za vrednovanje rudarskih projekata (engl. *Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs*), koji obuhvata dugogodišnja iskustva mnogih svetskih kompanija za projekte procene uticaja na životnu sredinu (engl. *Environmental Impact Assessments - EIAs*).

Standardi uglavnom jednostavno predstavljaju smernice za uspostavljanje i poboljšanje procesa za upravljanje rizicima u organizaciji. Oni ne obavezuju organizacije na primenu, ali ih organizacije najčešće koriste jer sadrže i višegodišnju najbolja praksa od strane niza organizacija sa velikim i relevantnim iskustvom. U Tabeli 2.1.1. dat je prikaz osnovnih opšteprihvaćenih međunarodnih standarda za upravljanje rizicima.

**Tabela 2.1.1. Osnovni međunarodni standardi za upravljanje rizicima**

Naziv	Svrha/opis	Delokrug
<b>AS/NZS 4360</b> <b>Risk Management</b> <i>AS/NZS 4360</i> <i>Upravljanje rizicima</i>	AS/NZS 4360 pruža generički vodič za identifikaciju, analizu, procenu, tretiranje, praćenje, komuniciranje i upravljanje rizicima kako bi se postigla pouzdanija osnova za donošenje odluka i planiranje. Ovaj standard se primenjuje dobrovoljno.	Odnosi se na širok niz aktivnosti, odluka ili operacija bilo kojeg javnog, privatnog ili društvenog preduzeća, grupe ili pojedinca.
<b>COSO ERM (2017)</b> <b>COSO</b> <i>Upravljanje rizicima u preduzećima</i>	COSO ERM je okvir koji pruža integrisane principe, zajedničku terminologiju i praktičnu implementaciju smernica za razvoj ili merenje performansi u procesu upravljanja rizicima preduzeća. Ovaj standard se primenjuje dobrovoljno.	Odnosi se na menadžment, regulatorna tela i sve koji su zainteresovani za bolje razumevanje upravljanja rizicima u preduzećima.
<b>ISO 31000:2018</b> <b>Risk Management</b> <i>ISO 31000:2018</i> <i>Upravljanje rizicima</i>	ISO 31000 pruža principe i opšte smernice o upravljanju rizicima. Odnosi se na bilo koju vrstu rizika, bez obzira na njegovu prirodu. Primena je dobrovoljna.	Odnosi se na sva javna, privatna ili društvena preduzeća, asocijacije, grupe ili pojedince.
<b>ISO 9000:2015</b> <b>Quality Management System</b> <i>Sistem upravljanja kvalitetom</i> <b>ISO 9001:2015</b> <b>Quality management systems -Requirements</b> <i>Sistem upravljanja kvalitetom - Zahtevi</i>	ISO 9000 je grupa standarda za upravljanje kvalitetom tako da organizacije mogu pravovremeno da unapređuju funkcionisanje i zadovoljstvo kupaca na osnovu procene rizika poslovanja. Značajan je i pristupačan, holistički i prilagodljiv pristup procesima upravljanja rizicima.	Nema ograničenja i mogu se koristiti u svim industrijama i sektorima i prihvatljivi su za bilo koji obim poslovanja.
<b>ISO/IEC 31010</b> <b>Risk Management - Risk Assessment Techniques</b> <i>ISO/IEC 31010</i> <i>Upravljanje rizicima - Tehnike procene rizika</i>	ISO 31010 pomaže organizacijama u implementaciji načela upravljanja rizicima i smernica koje je objavio ISO 31000:2019 (dopunjen sa ISO 31073:2022) i bavi se konceptima procene rizika, procesima procene i izborom tehnika procene rizika. Ovaj standard nije namenjen za sertifikaciju, regulatorne ili ugovorne primene.	Odnosi se na sva javna, privatna ili društvena preduzeća, asocijacije, grupe ili pojedince.
<b>ISO/IEC Guide 51 Safety aspects</b> <b>Guidelines for their inclusion in standards</b> <i>ISO/IEC Guide 51</i> <i>Bezbednosni aspekti</i> <i>Smernice za njihovo uključivanje u standarde</i>	Ovaj vodič pruža definicije bezbednosnih aspekata vezanih za upravljanje rizicima. Ima za cilj da pruži smernice za uključivanje bezbednosnih aspekata u dokumente upravljanja rizicima.	Odnosi se na one koji se bave upravljanjem rizicima i na one koji razvijaju vodiče, procedure i pravila postupanja u vezi upravljanja rizicima.
<b>ISO 31073:2022</b> <b>Risk management Vocabulary Guidelines for use in standards</b> <i>ISO 31073:2022</i> <i>Upravljanje rizicima</i> <i>Rečnik</i> <i>Smernice za korišćenje u standardima</i>	Ovaj priručnik pruža definicije opštih pojmova vezanih za upravljanje rizicima. Ima za cilj da podstiče uzajamna i dosledna shvatanja koherentnog pristupa i opisa aktivnosti koje se odnose na upravljanje rizicima, kao i korišćenje jedinstvene terminologije upravljanja rizikom u poslovnim procesima.	Odnosi se na one koji se bave upravljanjem rizicima, one koji su uključeni u aktivnosti ISO i na one koji razvijaju nacionalne ili specifične standarde, vodiče, procedure i pravila postupanja u vezi upravljanja rizicima.

<b>BS 31100</b> <b>Risk Management</b> <b>BS 31100</b> <i>Upravljanje rizicima</i>	BS 31100 pruža osnovu za organizacije da razumeju, kreiraju, integrišu i održavaju programe upravljanja rizicima dajući preporuke određenom modelu, okviru i procesu, sa ciljem povećanja mogućnosti organizacije za ispunjenje njenih zadataka.	Odnosi se na bilo koju organizaciju bilo koje veličine.
---	--	---

Pošto svaka aktivnost uključuje određeni stepen neizvesnosti, nemoguće je dostići apsolutnu nulu rizika u praksi. Bez obzira na to, udruženja i ljudi često nastoje da ograniče rizik koliko god se razumno moglo očekivati kroz izbegavanje rizika, smanjenje rizika, i prepoznavanje opasnosti. Cilj je obično smanjenje rizika na prihvatljiv nivo, jer praktično nije moguće u potpunosti eliminisati sve rizike.

U Republici Srbiji je veoma dobro i jasno definisana zakonska regulativa u oblasti upravljanja prirodnim resursima zaštite životne sredine i ocenom rizika u skladu sa direktivama Evropske unije.

Prema Nacionalnoj strategiji održivog korišćenja prirodnih resursa i dobara (Sl. glasnik RS, br. 33/2012), zakonski okvir iz oblasti zaštite životne sredine, značajan za korišćenje mineralnih resursa, čine: Zakon o zaštiti životne sredine, Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu (Sl. glasnik RS, br. 94/2024-379), Zakon o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu (Sl. glasnik RS, br. 94/2024-369), Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine (Sl. glasnik RS, broj 135/04), Zakon o zaštiti vazduha (Sl. glasnik RS, broj 36/09), Zakon o izmenama i dopunama Zakona o upravljanju otpadom (Sl. glasnik RS, br. 35/2023), kao i veći broj uredbi i pravilnika.

Zakonski okviri iz ostalih oblasti, koji su bitni i za mineralne resurse, obuhvataju: Zakon o rudarstvu i geološkim istraživanjima (Sl. glasnik RS, br. 101/2015-3, 95/2018-267 (dr. zakon), 40/2021-45), Zakon o energetici (Sl. glasnik RS, br. 84/04, 57/11 - dr. zakon i 80/11), Zakon o planiranju i izgradnji, Zakona o zaštiti prirode (Sl. glasnik RS, br. 36/09, 88/10 i 91/10 - ispravka), Zakon o vodama (Sl. glasnik RS, broj 30/10), Zakon o poljoprivrednom zemljištu (Sl. glasnik RS, br. 62/06, 65/08 - dr. zakon i 41/09), Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu (Sl. glasnik RS, broj 101/05), kao i veliki broj pravilnika.

Institut za standardizaciju Republike Srbije donosi standarde i srodne dokumente sa oznakom SRPS. U okviru upravljanja zaštitom životne sredine i rizicima donete su i familije standarda SRPS ISO 14001:2015/Amd. 1:2024 i SRPS ISO 31000:2019.

## 2.2. Vrste rizika pri površinskoj eksploataciji

Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina je integralna i najviše korišćena komponenta globalne rudarske industrije, koja igra ključnu ulogu u otkopavanju vrednih minerala i resursa. Ovaj način eksploatacije se najčešće primenjuje kada se ležišta mineralnih sirovina nalaze pri relativno neposrednoj površini Zemlje, ukoliko je ekonomski opravdano i tehnički izvodljivo uklanjanje otkrivke kako bi se došlo do željenih mineralnih sirovina.

Površinski kopovi značajno doprinose svetskoj proizvodnji mineralnih sirovina, snabdevajući osnovnim sirovinama industrije kao što su energetika, građevinarstvo, IT tehnologije, poljoprivreda, farmacija i dr. Rudarstvo ima ključnu ulogu u podsticanju ekonomskog razvoja, obezbeđivanju osnovnih sirovina za svaku industriju i podržavanju globalnog stanovništva čiji broj stalno raste [10]. Iako je površinska eksploatacija i generalno rudarstvo ključni pokretač ekonomskog razvoja, ono takođe otvara specifična ekološka i socijalna pitanja, što podstiče stalne napore da se uspostavi ravnoteža između održive eksploatacije nezamenjivih i neobnovljivih resursa neophodnih za život i zaštite životne sredine. Istovremeno, globalna potražnja za mineralnim sirovinama, vođena porastom stanovništva, urbanizacijom i tehnološkim napretkom, podstakla je i povećanje rudarskih aktivnosti širom sveta. Trend podstreka izgradnje obnovljivih izvora energije radi smanjenja emisija u vazduh dovodi do još veće potražnje za velikim brojem kritičnih i retkih minerala [11][12]. Zbog rastućih potreba za snabdevanjem mineralnim resursima, rudarska industrija stremi ka usvajanju odgovornih i ekološki prihvatljivih održivih praksi.

I pored činjenice da je rudarstvo kritična industrija koja podstiče globalni ekonomski razvoj i obezbeđuje osnovne sirovine, rudarstvo takođe ima svoje izazove i opasnosti. Iako su rudarske

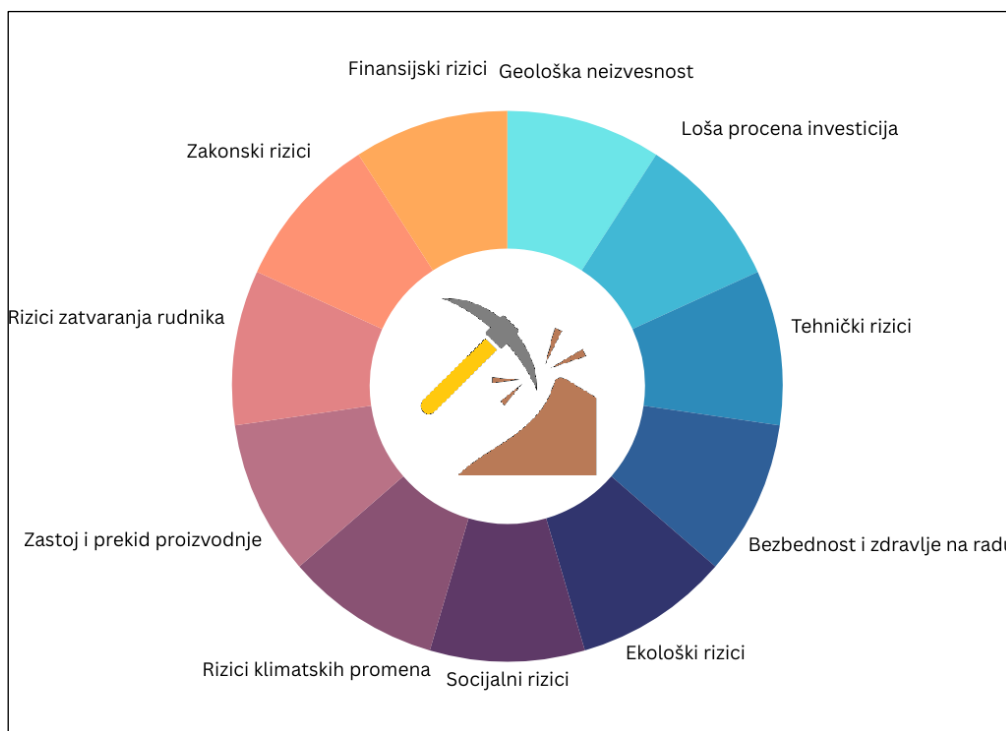
aktivnosti ključne u eksploataciji vrednih mineralnih sirovina, one dolaze sa inherentnim rizicima koji obuhvataju ekološke, društvene i bezbednosne domene. Rudarstvo i zainteresovane strane se suočavaju sa složenom mrežom izazova koji zahtevaju pažljivo razmatranje i proaktivno ublažavanje uticaja.

Istraživanje rizika povezanih sa rudarstvom ima za cilj da pojasni višestruku prirodu ovih izazova, naglašavajući važnost odgovorne prakse, tehnoloških inovacija i sveobuhvatnih regulatornih okvira. Ulaskom u zamršenost rudarskih rizika, otkriva se uticaj eksploatacije na životnu sredinu, društvenu dinamiku zajednica u blizini rudarskih lokacija i imperativ strogih bezbednosnih mera za zaštitu radnika koji su angažovani u ovoj osnovnoj industriji. U navigaciji ovih složenih problema, rudarski sektor je primoran da uspostavi delikatnu ravnotežu između zadovoljavanja rastućih svetskih potreba za mineralnim sirovinama i obezbeđivanja održivosti, bezbednosti i očuvanja delikatnih ekosistema na planeti.

Kada se napomenuti problemi vezani za rizike stave u kontekst rudarstva, može se primetiti niz tehnoloških, ekoloških, finansijskih i socijalnih izazova za moderno održivo rudarstvo. Čak i u svom najboljem izdanju, rudarstvo je zahtevan posao koji sadrži rizike u mnogo različitih aspekata. Poslednjih godina, opseg rizika u rudarstvu se proširio jer je iscrpljivanje tradicionalnih i lako dostupnih ležišta preusmerava realizovanje rudarskih projektata, a posebno vredne projekte eksploatacije zlata i kritičnih minerala, da se upute u zabačene ili nerazvijene teritorije gde se javljaju novi izazovi: rudimentarnom ili nepostojećom infrastrukturu; nedovoljno radne snage; izbijanja resursnog nacionalizma; fiskalna volatilitet; naoružani ilegalni rudari; povremeni državni udar; itd. [13]. Osim navedenih novih izazova modernog rudarstva, u rudarstvu postoji dugi niz već dobro poznatih najznačajnijih potencijalnih rizika, koji su detaljnije objašnjeni u sledećim poglavljima:

- geološka neizvesnost,
- loša procena investicija u eksploataciju,
- tehnički rizici,
- bezbednost i zdravlje na radu,
- ekološki rizici,
- socijalni rizici,
- rizici klimatskih promena,
- rizici zastoja i prekida proizvodnje,
- rizici integralnog zatvaranja i rehabilitacije rudnika sa rekultivacijom,
- zakonski rizici,
- finansijski rizici.

Svi navedeni rizici (Slika 2.2.1.) imaju značajne posledice po eksploataciju mineralnih sirovina, i samim tim posebno i na ekološke i socijalne faktore u okviru eksploatacije. Važno je napomenuti da su ovi rizici prikazani u obliku kruga zbog svoje uzajamne povezanosti i međusobnog uticaja, ali nisu povezani nužno u ovom redosledu, već su isprepletani i dopunjuju se. Na primer, finansijski i ekonomski rizici zavise od svih drugih vrsta rizika, jer bilo koji ostvaren nepovoljni događaj u domenu tih rizika dovodi do finansijskih posledica. Istovremeno, nepovoljni događaj tehničkog rizika može dovesti do zastoja u otkopavanju ili transportu i prekida proizvodnje, što se opet direktno reflektuje na finansijske rizike, odnosno novčane gubitke. Svi rizici u manjoj ili većoj meri utiču jedni na druge, a zajedničko svojstvo im je refleksija na finansijske rizike.

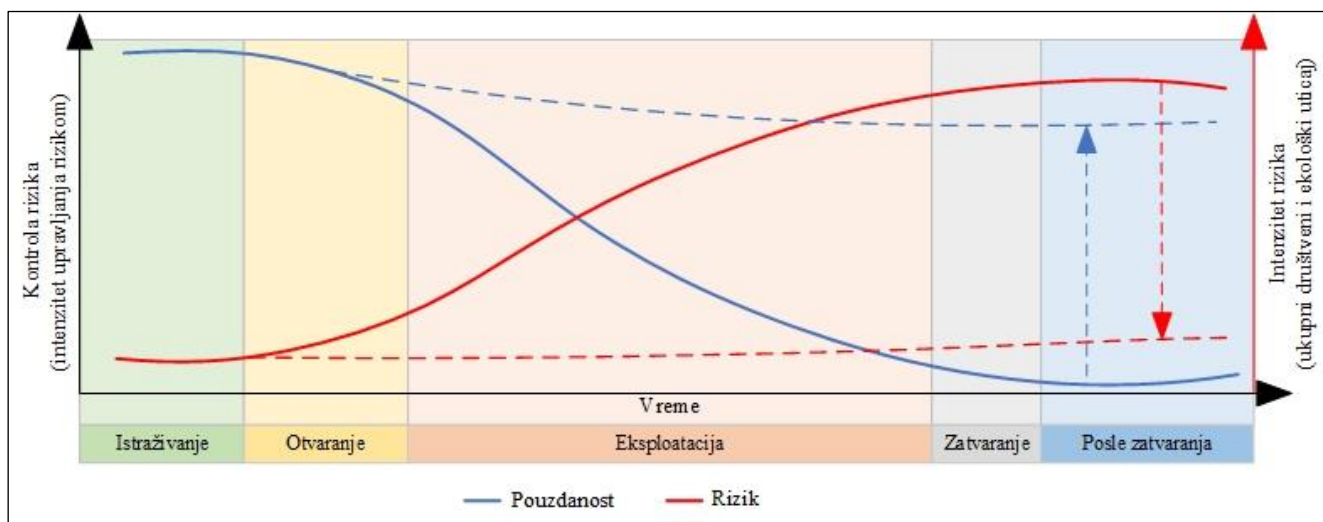


*Slika 2.2.1. Osnovni rizici prisutni u rudarstvu*

Veliki broj ovih rizika može biti uspešno prepoznat na vreme, uz neprestano praćenje rada sistema i procene rizika, uz preduzimanje preventivnih mera radi smanjenja verovatnoće rizika nepovoljnog scenarija i sprečavanja nastanka negativnih posledica. Negativne posledice u kontekstu rudarskih rizika su najčešće svedene na novčane gubitke, ali ako su štete dovoljno velike, može doći i do katastrofalnih smrtnih ishoda, do prinudnog zatvaranja rudnika i trajnog prestanka rada.

Jedan od ključnih koraka u osiguravanju efikasnosti, održivosti i bezbednosti rudarskih operacija jeste procena rizika. Ova procena predstavlja bitan deo planiranja svih operativnih faza eksploatacije, često u rizičnim jedinstvenim prirodnim uslovima radne sredine i klime. Preduzeća mogu primeniti efikasne tehnike za ublažavanje uticaja kako bi zaštitila svoje zaposlene, okolne zajednice i životnu sredinu, sistematski identifikujući potencijalne opasnosti, kao što su klizišta, kvarovi na opremi, izlivanje hemikalija, emisije gasova ili posledica klimatskih uslova. Takođe, procene rizika omogućavaju usklađenost sa regulatornim zahtevima, čime se smanjuje mogućnost negativnih pravnih i finansijskih posledica. Identifikovanje oblasti gde ulaganja u mere bezbednosti donose najveće koristi pomažu u optimizaciji raspodele resursa, čime se poboljšava operativna efikasnost. U širem kontekstu, smanjenjem štete po životnu sredinu i podsticanjem odgovornog upravljanja resursima, procena rizika doprinosi održivim rudarskim praksama. Otuda se uočava značaj i potreba identifikacije i smanjenja rizika u površinskoj eksploataciji.

Svi površinski kopovi su jedinstveni u obuhvatanju niza metoda eksploatacije prilagođenih specifičnim karakteristikama i prirodnim uslovima ciljanog ležišta i mehanici okolnih stena kao radne sredine. Ono što svi projekti površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina imaju zajedničko su faze razvoja površinskog kopa – faza istraživanja, faza otvaranja, faza eksploatacije, faza zatvaranja površinskog kopa i faza nakon zatvaranja kopa (Slika 2.2.2.). Faze razvoja površinskog kopa i različiti procesi unutar njih povlače za sobom različite vrste i intenzitete rizika. Vrste rizika se povećavaju sa svakom sledećom fazom razvoja, i obično utiču jedni na druge. Kao što je na Slici 2.2.2. prikazano, od izuzetne važnosti za sigurnu eksploataciju je da se teži ka povećanju pouzdanosti sistema eksploatacije, čime se značajno smanjuju rizici tokom svih faza razvoja površinskog kopa. Bezbedna i uspešna eksploatacija zavisi od tog veoma značajnog i osetljivog balansa održivosti.



Slika 2.2.2. Faze razvoja površinskog kopa i njihov odnos sa rizicima [14]

Ključni faktor za razumevanje rizika je njihova stručna i svestrana analiza, nakon čega se postupa u skladu sa donesenim zaključcima radi smanjenja rizika u korist održivog i sigurnog rudarstva u skladu sa svetskim standardima i dobrom praksom. U narednim poglavljima su detaljnije objašnjeni rizici koji se pojavljuju pri površinskoj eksploataciji mineralnih sirovina u svim fazama razvoja, koji su ključni za uspešno upravljanje rizicima zbog svoje uzajamne povezanosti, posebno kada je u pitanju zaštita životne sredine. Održivo upravljanje rizicima, što se u ovoj disertaciji odnosi na detaljnu procenu ekoloških rizika i smanjenje verovatnoće njihove pojave, dovodi do boljeg i efikasnijeg upravljanja sistemom površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina.

### 2.2.1. Rizici neizvesnosti rezultata geoloških istraživanja - Geološki rizici

Svako planiranje metode eksploatacije bilo kog ležišta mineralnih sirovina počinje od formiranja geološkog modela ležišta na osnovu rezultata geoloških istraživanja, koji su karakteristično puni neizvesnosti tako da praktično svi geološki izveštaji, elaborati, merenja i proračuni sadrže neku vrstu i stepen nesigurnosti [15]. Dokazano je da će geološke ekspertske interpretacije takođe gotovo uvek biti sa određenim stepenom nesigurnosti [16][17] i da su problemi povezani sa geološkim ulaznim podacima 66% od ukupnih problema koji se javljaju prilikom pravljenja studije izvodljivosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina [18]. Samim tim je i opštepoznato da je geološka neizvesnost neizbežna u svim geološkim i rudarskim projektima. Geološka neizvesnost je generalno definisana kao odsustvo sigurnosti i preciznosti pri opisu geoloških modela [19].

Autori Nurgaliev i drugi smatraju da se verovatnoća nastanka geoloških rizika mora smatrati jednim od glavnih kriterijuma za procenu atraktivnosti investicionih projekata, što su dokazali na primeru pada proizvodnje nafte u odnosu na planiranu proizvodnju. Pokazano je da je najveći uzrok pada proizvodnje nafte geološki rizik, pa zatim tehnološki i tehnički rizici [20]. Jasno je da ukoliko proizvodnja bilo koje mineralne sirovine ne ispuni isplanirane količine, dolazi do gubitaka u profitu, odnosno projekat nije ispunio očekivanja u odnosu na investicije. Takva izuzetno nepovoljna situacija se može izbeći samo ako se geološki rizici svedu na minimum.

Manje ili veće razlike u otkopavanju otkrivke i proizvodnji mineralnih sirovina su uvek prisutne pri eksploataciji ležišta mineralnih sirovina kao rezultat prirodnih uslova i geološke neizvesnosti i rizika, što pokazuje usko povezanu uzročno-posledičnu vezu između rudarstva i geologije. Autori Soleymani Shishvan M. i Benndorf J. su uspešno prikazali ovu vezu na primeru eksploatacije uglja kompleksnim kontinualnim sistemima, kombinirajući geostatističku simulaciju sa simulacijom sistema eksploatacije. Cilj im je bio da kvantifikuju efekat geološke nesigurnosti i njen uticaj na sposobnost isporuke ugovorenih količina i kvaliteta uglja, kao i na efikasnost sistema u smislu korišćenja osnovne opreme za eksploataciju. Simulacija sistema eksploatacije zasnovana na

procenjenom modelu pokazuje dobijanje značajno manjih količina otkopanog uglja (10%) od geološki procenjenog proseka. Jasno je da model potcenjuje proizvodnju uglja za definisanu dinamiku razvoja površinskog kopa. To je uglavnom zbog ignorisanja *in situ* varijabilnosti i geološke nesigurnosti. Iako je u ovom slučaju model potcenio količine uglja u ležištu, važno je napomenuti da ove tehnike takođe mogu dovesti do precenjivanja količine u zavisnosti od složenosti lokalnih geoloških uslova [21]. Simulacija je pokazala da nepotpuno geološko znanje o ležištu uzrokuje probleme u realizaciji proizvodnje, što je posebno značajno kad su eksploatacija uglja i kontinualni sistemi u pitanju.

Jedan od oblika neizvesnosti se javlja kada loše dizajnirani protokoli uzorkovanja generalno rezultiraju visokim rizikom projekta zbog veštačkog povećanja varijabilnosti sadržaja mineralne sirovine. Proračuni rezervi nakon netačnog uzorkovanja stvaraju gubitke koji nisu uvek evidentni. Pouzdanost analiza i naknadna kontrola rizika i neizvesnosti projekta mogu se postići efikasnim protokolima [22].

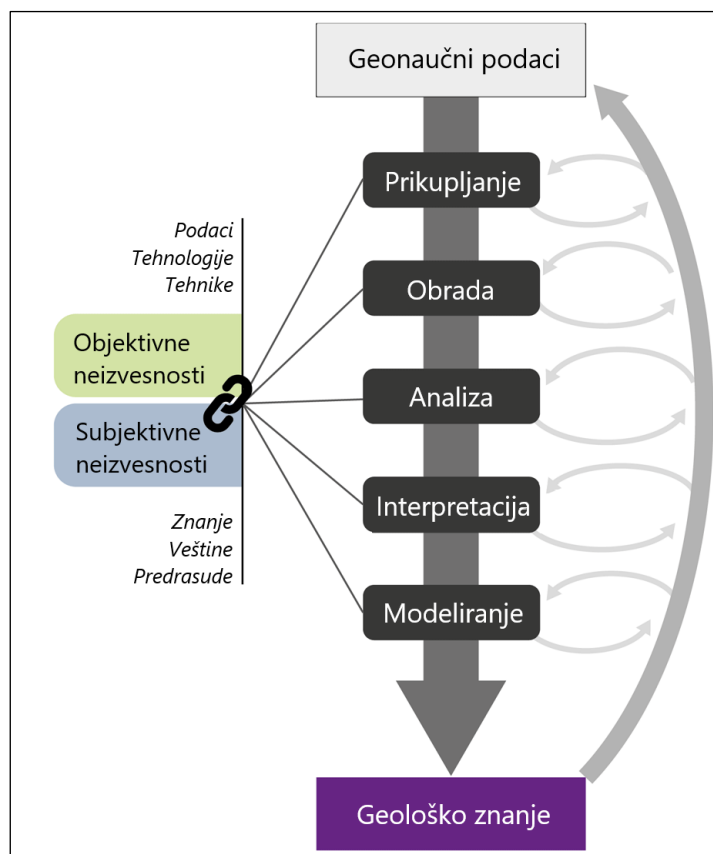
Najčešći ograničavajući faktor kada se radi o proceni geološke neizvesnosti je dostupnost podataka. U određenim razvijenim i lakše dostupnim područjima, kvantifikacija nesigurnosti na manjim dubinama istraživanja je često izvodljiva zbog relativno visokog stepena uzorkovanja tla (za infrastrukturne projekte i objekte upravljanja podzemnim vodama, itd.). Geološka istraživanja na većim dubinama ili na udaljenim regionima, koji imaju manji broj istražnih bušotina predstavljaju veći izazov za kvantifikaciju nesigurnosti [17].

Kvantifikovanje neizvesnosti je stoga proces analize koliko su procene daleko od bilo koje opisive istine o karakteristikama ležišta. U ovom smislu, greška je razlika, odnosno mera preciznosti, dok je neizvesnost opseg ili procena tačnosti [23].

Dakle greška je kvantifikovana razlika između poznatog parametra i merene varijable. Istinitost, preciznost i tačnost se odnose na grešku i zahtevaju izvesno znanje ili očekivanje prave vrednosti za poređenje [23]:

- Istinitost je bliskost saglasnosti između prosečne vrednosti dobijene iz velike serije rezultata ispitivanja i očekivane prave vrednosti.
- Preciznost je bliskost saglasnosti između nezavisnih merenja.
- Tačnost je slaganje između merenja i očekivane prave vrednosti. To je izraz relativne veličine greške.

Međutim, neizvesnost karakteriše opseg vrednosti unutar kojeg se procenjuje da praktično nemerljiv ili nepoznat parametar postoji na određenom nivou sigurnosti. Treba očekivati da će svako ponavljanje procesa procene na istom nivou sigurnosti proizvesti rezultat u granicama opsega nesigurnosti [23]. To znači da će dobijeni geološki podaci biti u određenom opsegu tačnosti, ali da neće moći da se procene kao tačni sa 100% sigurnošću. Na Slici 2.2.1.1. prikazano je inovirano razumevanje izvora neizvesnosti u procesu generisanja geološkog znanja, po autorima Pérez-Díaz, L. et al. Slika jasno pokazuje da su objektivna i subjektivna neizvesnost moguće na svakom koraku pri formiranju geološkog znanja o ležištu mineralnih sirovina.



Slika 2.2.1.1. Izvori neizvesnosti u procesu sticanja geološkog znanja [23]

Najvažniji zaključak analize je da treba pratiti i beležiti neizvesnost tokom celog toka sticanja geološkog znanja [24][25]. Trenutno, neizvesnosti imaju tendenciju da se prepoznaju u diskretnim fazama toka rada, ali se onda zanemaruju, tako da se u svakoj fazi daje model najbolje pretpostavke za dalju analizu, a sve ranije nejasnoće se zaboravljaju [26].

Najbolji način da se smanje rizici geološke neizvesnosti je da se dokumentuju sticanja geološkog znanja, i beleženja neizvesnosti tokom prikupljanja, obrade, analize, interpretacije i modeliranja podataka u domenu geologije, koji bi zatim trebalo da prođe kroz procenu rizika u obliku formalnog dokumenta.

Najčešće se geološki rizici svrstavaju u poseban tip tehničkih rizika, ali s obzirom na to da je geološko znanje početni i ključni korak za projektovanje površinskih kopova, i glavni uzrok svih daljih grešaka, treba ih izdvojiti kao zaseban rizik, posebno pri izradi studija izvodljivosti, što je praktično prisutno u svim danas prihvaćenim savremenim metodama klasifikacije resursa i rezervi mineralnih sirovina. Sa aspekta ekološkog uticaja radovi na istraživanju su uglavnom minorni sa efikasnim obnavljanjem životne sredine, tako da generalno ne menjaju ekološko stanje.

## 2.2.2. Loša procena investicija

Investicije u rudarstvu su uglavnom asocirane sa većim nivoom rizika i nesigurnosti, u poređenju sa drugim industrijama. Rudarski projekti su dugotrajni i prate ih velike investicije pre same eksploatacije mineralnih sirovina i postizanja bilo kakvog profita, zbog potreba da se nabavi skupa rudarska oprema, vozila i izgradi kompletna infrastruktura. To automatski zahteva detaljnu analizu investicija i potencijalnog profita pre početka detaljnog istraživanja i rada na otvaranju bilo kog rudarskog objekta, odnosno površinskog kopa. Procena investicija se radi u okviru prethodne studije izvodljivosti i pogotovo studije izvodljivosti eksploatacije konkretnog ležišta mineralnih sirovina, gde treba da se prikaže da li je eksploatacija ekonomski opravdana sa obuhvatanjem svih procenjenih internih i eksternih rizika.

Rizici ulaganja u održive rudarske projekte se u svetu povećavaju iz godine u godinu, što pokazuju i istraživanja prikazana u izveštaju Mining Journal o rizicima za 2024. godinu. Prosečno,

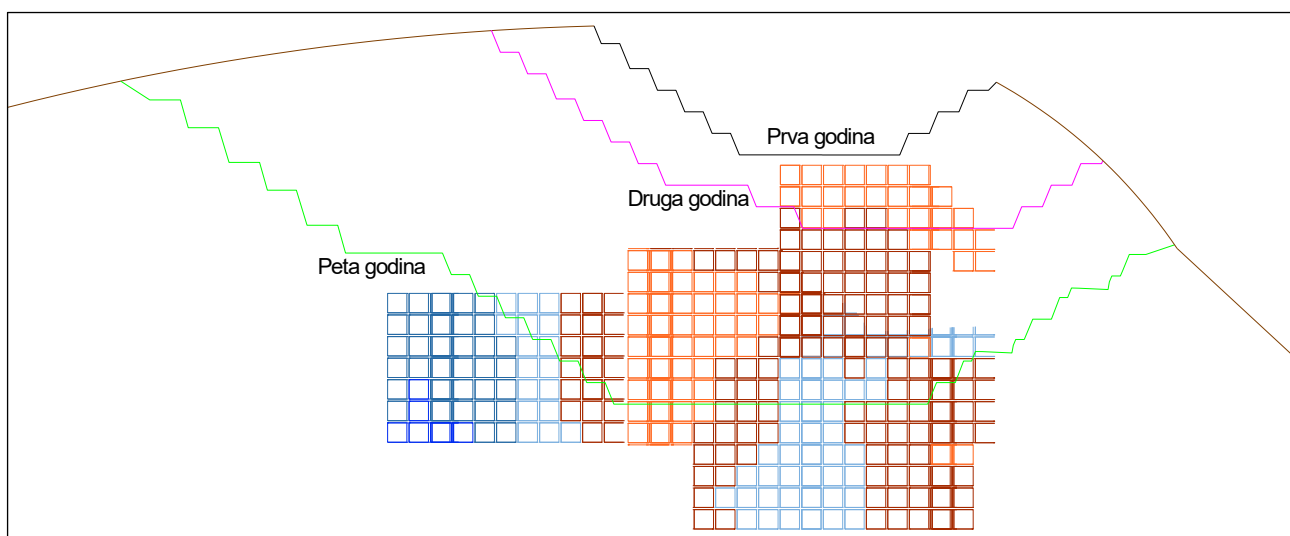
učešće rizika po uzrocima u ukupnim rizicima ulaganja u rudarske projekte iznose: Zakonski - 35%. Upravljački - 15%, Socijalni - 15%, Ekološki - 15%, Fiskalni - 12.5% i Infrastrukturni 7.5% [27].

Po Zakonu o rudarstvu i geološkim istraživanjima Republike Srbije (Službeni glasnik RS, br. 101/2015-3, 95/2018-267 (dr. zakon), 40/2021-45, član 87), *studija izvodljivosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina sadrži prikaz uslova i idejno rešenje načina eksploatacije, pripreme mineralnih sirovina, plasmana mineralnih sirovina, radni vek i godišnji kapacitet, analizu uticaja na životnu sredinu sa merama zaštite i sanacije životne sredine, mere rekultivacije, uticaj rudarskih aktivnosti na društvenu zajednicu, tehno-ekonomsku ocenu sa novčanim tokom i potrebnim novčanim sredstvima i brojem angažovanih i zaposlenih lica* [28].

Studija izvodljivosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina detaljno analizira sve investicije i troškove u svim fazama životnog veka rudnika, uzimajući u obzir cene mineralne sirovine, i na osnovu toga pokazuje konačan procenjen profit od eksploatacije ležišta.

Investicije se odnose na alokaciju novca ili kapitala sa očekivanjem da će se tokom vremena ostvariti određeni profit. U slučaju rudarstva, profit se može ostvariti tek nakon određenog perioda koji je neophodan za izgradnju objekata, za otvaranje rudnika i za postepeno pojavljivanje i rasta zarade u funkciji trenutne zahvaćenosti ležišta mineralne sirovine prema dinamici eksploatacije. Izgradnja rudarskih objekata zahteva poprilične kapitalne investicije, pa je postizanje zarade direktno uslovljeno postizanjem proizvodnje na površinskom kopa. U cilju postizanja zarade, vlasniku rudnika je u najvećem interesu da rudnik što pre počne sa proizvodnjom, i da dostigne pun kapacitet eksploatacije u što kraćem roku.

Prilikom napredovanja površinskog kopa, kontura će zahvatati sve veće količine mineralne sirovine, dok ne dođe do punog kapaciteta eksploatacije (Slika 2.2.2.1). Mora da prođe određeni period otvaranja površinskog kopa da bi se konturom kopa zahvatilo ležište mineralne sirovine i dostigla puna planirana proizvodnja, sem u retkim izuzecima kada je mineralna sirovina pri samoj površini terena.



Slika 2.2.2.1. Odnos zahvaćenosti mineralne sirovine i otkrivke na površinskom kopa i dinamike napredovanja

Tako se, na primer, kod strmih i blago nagnutih ležišta (Slika 2.2.2.1.) može primetiti, da prvi period (npr. prva godina) pri površinskoj eksploataciji u većini slučajeva služi za uklanjanje otkrivke, odnosno otvaranje površinskog kopa, pri čemu mineralna sirovina nije zahvaćena konturom kopa. Koeficijent otkrivke i usvojena dinamika rada uslovljavaju vremenski period otvaranja površinskog kopa. Cilj svake kompanije je da otvori površinski kop u što kraćem roku, jer ne postoji nikakva zarada pre zahvatanja mineralne sirovine konturom i plasiranja iste na tržište. U periodu kada površinski kop radi punim kapacitetom (npr. peta godina) je uobičajeno i najveći profit od plasiranja maksimalnih količina mineralne sirovine na tržište. Podrazumeva se da količine mineralne sirovine po pravilu počinju da opadaju kako se kontura kopa približava svojoj završnoj konturi, odnosno kada

se površinski kop približava kraju radnog veka. Kompleksna dinamika otkopavanja u površinskom kopu demonstrira zašto je neophodno da investitori budu sigurni u buduću profit sa dugim periodom povraćaja investicija.

Procena investicija prilikom izrade studije izvodljivosti eksploatacije za bilo koje ležište mineralnih sirovina je ključna za buduću zaradu. Ukoliko procena investicija nije odrađena kako treba, ako dođe do velike inflacije, ili ako se cena mineralne sirovine na tržištu drastično smanji, postoji verovatnoća da površinski kop neće biti profitabilan.

Takozvana mineralna roba (u rudarstvu mineralna sirovina) predstavlja neobnovljive resurse podeljene na metalne, nemetalne i energetske sirovine. Cene roba su jedan od najznačajnijih parametara koji se koriste u proceni mineralnih resursa i mineralnih rezervi i u ekonomskoj analizi mineralne imovine [29]. Generalno, cene mineralnih sirovina su diktirane od strane ponude i tražnje. Za vek eksploatacije, koji obično traje 2-50 godina u zavisnosti od veličine ležišta, promene na globalnom tržištu predstavljaju veliki nivo neizvesnosti, odnosno rizika. Takođe je specifično da na probleme inflacije i fluktuacije cena mineralnih sirovina uglavnom nije moguće uticati, jer su inflacija i cene zavisni od tržišta i svetskih događaja. Zato se inflacija, kamatna stopa i devizni kurs smatraju sistematskim rizicima, ili tržišnim rizicima [30].

Troškovi proizvodnje, koji su promenljivi u vremenu prema nivou aktivnosti, postavljaju donju granicu za održive cene. Razmatranja o potražnji, kao što su otvaranje i zatvaranje postrojenja ili neočekivani događaji kao što su industrijske nesreće ili prirodne katastrofe, utiču na kratkoročne varijacije cena. Globalni događaji kao što su ratovi, recesije, inflacija ili ekonomski rast utiču na dugoročne trendove [31]. Ovakvi događaji utiču na cene svega na tržištu, ali pogotovo utiču na ekonomiju u rudarstvu, gde nije neobično da se cena rude promeni za 25% do 40% u periodu od jedne godine [32][33]. U radu autora Brennan-a i Schwartz-a zaključeno je da promena cene mineralne sirovine na tržištu predstavlja momentalni rizik za vrednost konkretnog rudnika.

Da bi se promene cena na tržištu uzele u obzir prilikom procene ekonomske izvodljivosti tj. opravdanosti rudarskog projekta, radi se analiza osetljivosti na promenu cena ciljne mineralne sirovine. Analiza osetljivosti po definiciji određuje kako različite vrednosti nezavisne promenljive (u ovom slučaju cene rude) utiču na zavisnu promenljivu (npr. neto sadašnju vrednost) pod datim skupom pretpostavki. Predviđanje cena mineralnih sirovina je uvek bio važan i težak zadatak, i nijedna od tradicionalnih metoda (npr. ekonometrija, stohastičke metode, vremenske serije, teorija haosa i druge) predviđanja promena cena tokom vremena nije bila u velikoj meri uspešna [34]. Ipak, variranje cena je samo jedna komponenta procene ekonomičnosti investicija, pa treba detaljnije proučiti rizike na svim nivoima u okviru rudarskog projekta.

Često je potreban bankarski kredit za početna ulaganja u rudarski objekat, što je još jedan od razloga za detaljnu analizu prilikom pravljenja studije izvodljivosti eksploatacije. Visok nivo kapitalnih investicija i dugoročni projekti dovode do potrebe za korišćenjem pozajmljenih bankarskih resursa, što uzrokuje rizik od gubitka kontrole nad upravljanjem kompanije u slučaju kašnjenja kredita. Autori Frolova V. et al. su naveli sve rizike koji ometaju investicionu aktivnost [35]:

- rizik od nestabilnosti privrednog zakonodavstva;
- mogućnost ekonomske i finansijske krize u zemlji;
- spoljnotrgovinski rizici za organizacije koje obavljaju spoljnotrgovinsku delatnost u vezi sa mogućnošću uvođenja ograničenja u isporuci robe;
- politički rizici i nepovoljne društveno-političke promene u zemlji;
- fluktuacije tržišnih cena i kurseva;
- prirodni i klimatski rizici;
- proizvodni rizik – kvarovi opreme, nezgode i sl.;
- neispravnost ili nedostupnost potrebnih informacija.

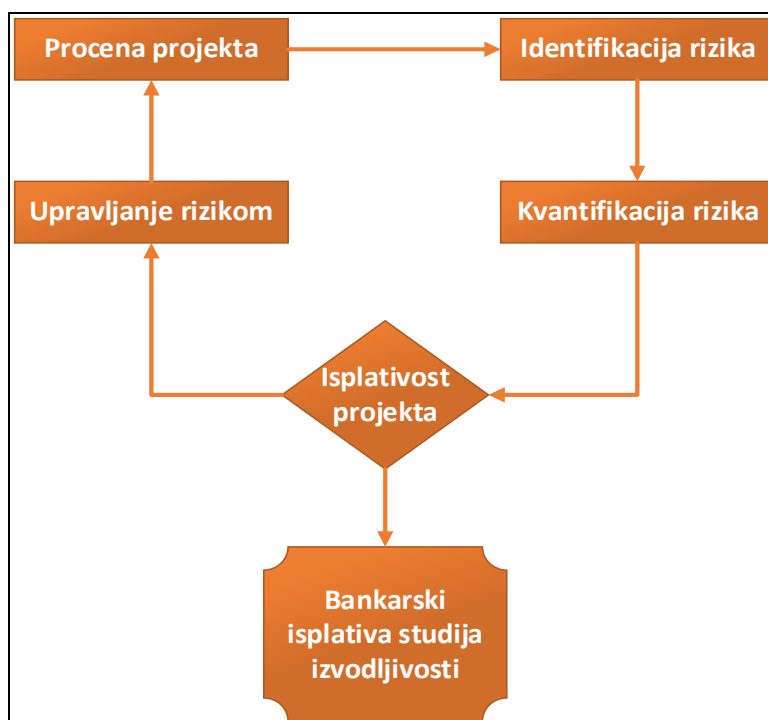
Geološka neizvesnost, o kojoj je bilo reči u prethodnom poglavlju, takođe igra veliku ulogu u proceni investicija. Zbog nemogućnosti da se dostigne visok nivo tačnosti podataka o ležištu, ulazni podaci za razvoj investicionog projekta rudarstva su u manjoj ili većoj meri nepotpuni.

Postoji puno literature o riziku ulaganja u rudarstvo [36][37], ali nedostaje globalna metodologija rizika odlučivanja [38]. Postojeće publikacije se fokusiraju na određeni izvor rizika

(npr. resursi, planiranje rudnika) ili procenu osetljivosti profitabilnosti projekta na varijacije ključnih parametara projekta, ali u većini slučajeva ne uspeavaju da identifikuju poreklo rizika i njegov uticaj na različite faze lanca vrednosti rudarskog projekta [38][39][40][41]. Većina studija izvodljivosti rudarskih projekata koristi analizu rizika zasnovanu na stohastičkom modelovanju neto sadašnje vrednosti (NSV - engl. *NPV*) projekta, koja uglavnom ne pruža donosiocima odluka zaista sveobuhvatnu analizu rizika povezanu sa nesigurnošću [38]. Kao rezultat toga, procena investicija u bilo koji rudarski projekat nema visok nivo pouzdanosti. Investitori žele da razumeju kako da uračunaju ove rizike i mogućnosti u posao koji procenjuju za ulaganje i da osiguraju da odbori i menadžerski timovi uzmu u obzir obaveze prema zaštiti životne sredine, društvu i vlasti prilikom alokacije kapitala [42].

Cilj studije izvodljivosti je da precizno ustanovi i dokaže profit rudarskog projekta ukoliko se eksploatacija mineralne sirovine vrši u skladu sa isprojektovanim planom eksploatacije, bez većih odstupanja. Studije izvodljivosti generalno ciljaju na tačnost kapitalnih procena od  $\pm 10-15\%$ , iako podaci sugerišu da ovaj procenat često nije postignut [43].

Da bi se dokazala profitabilnost eksploatacije ležišta mineralne sirovine sa velikom preciznošću, u finalnoj fazi studije izvodljivosti se mora primeniti specifična metodologija za identifikaciju i vrednovanje svih mogućih rizika (Slika 2.2.2.2) [44][45].



Slika 2.2.2.2. Metodologija procene isplativosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina [38]

Metodološki tok na Slici 2 je relevantan za bilo koje donošenje odluke pri kapitalnim investicijama koji zahtevaju ulazak u dugove tokom bilo kog momenta u rudarskom projektu, od istraživanja na lokalnom nivou do zatvaranja i rehabilitacije [38].

Ukoliko se ne koristi prikazan metodološki tok za upravljanje potencijalnim rizicima u svakoj fazi eksploatacije ležišta, ulazni podaci za procenu isplativosti projekta nisu ispravni i kompletni, i mogu da dovedu do pogrešne procene investicija i troškova, i samim tim greške kod izračunavanja profita. Iz svih prethodno napomenutih razloga, prikazano je na koji način loša procena investicija može biti posmatrana kao ozbiljan rizik u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina.

### 2.2.3. Tehnički rizici

Postoje različite definicije tehničkih rizika. Tehnički rizici (ponekad i tehnološki rizici ili rizici inovacije) su rizici uzrokovani upotrebom novih ili neproverenih tehnologija ili tehničke opreme ili

sredstava za proizvodnju. Tehnički rizici postoje usled stalnog razvoja i inovacija, a mogu i da proizilaze iz uvođenja novih proizvoda na tržište [46]. NASA je definisala tehničke rizike kao rizike povezane sa evolucijom dizajna i proizvodnje sistema od interesa koji utiče na nivo performansi i koji je neophodan da se ispune očekivanja zainteresovanih strana i tehnički zahtevi [47]. Može se zaključiti da su tehnički rizici neizvesnosti ili izazovi u vezi sa implementacijom i unapređenjem tehnologije u projektu, sistemu ili proceduri. Ove opasnosti mogu proizaći iz nedostataka, neočekivanih komplikacija ili tehničkih kvarova koji ometaju mogućnost postizanja planiranih rezultata.

Tehnički rizik se može odnositi na bilo koji od tehničkih zahteva u oblasti rudarstva. Tehnički rizici u kontekstu površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina se mogu posmatrati kao bilo koji rizici konkretno vezani za eksploataciju, mehanizaciju, mehaniku stena, odvodnjavanje, inženjerstvo, pripremu mineralnih sirovina, odlaganje otkrivke i jalovine itd., koji smanjuju mogućnost dostizanja željenog kapaciteta dobijanja mineralne sirovine. Kompanije i banke se uzdaju u rudarske eksperte za procene ovih rizika koji su usko vezani za rudarsku struku, zatim i za odabir najsigurnijih projektnih rešenja pri pravljenju prethodne studije izvodljivosti i studije izvodljivosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina.

Tehnički rizici se uglavnom mogu kontrolisati određenim merama čak i tokom aktivnog rada površinskog kopa. Primeri tehničkih rizika su:

- Loše uzorkovanje pri istraživanju koje dovodi do pogrešnih procena o rezervama,
- Greške pri projektovanju zbog geološke neizvesnosti ili druge projektantske greške,
- Loš izbor metode eksploatacije, nepridržavanje plana eksploatacije,
- Loš izbor rudarske opreme i pouzdanost opreme,
- Zastoji i ljudske greške pri otkopavanju i transportu mineralne sirovine i jalovine,
- Greške pri izračunavanju geomehaničke stabilnosti kopa i odlagališta, nemar pri formiranju kosina etaža,
- Nedovoljno dobre mreže komunikacije na kopu,
- Nepravilno odlaganje otkrivke i jalovine ili loša procena karakteristika radne sredine pri čemu dolazi do pojave klizišta/oticanja,
- Loše urađeno odvodnjavanje površinskog kopa i upravljanje vodama,
- Površna analiza aktuelnih podataka i dešavanja na površinskom kopu,
- Nepravilno zatvaranje površinskog kopa,
- Propusti u procesu integralne rehabilitacije završnog prostora površinskog kopa,
- Nedovoljna kontrola i monitoring uticaja na životnu sredinu.

Navedeni tehnički rizici su u većini slučajeva ljudska greška: pri izradi rudarskog projekta, potcenjivanju/precenjivanju pri odabiru projektnih rešenja, neiskustva, usled nemara, odstupanja od projekta, važećih standarda i slično. Prednost ovakvog tipa rizika je što može da se prevaziđe razumevanjem i uočavanjem. Razumevanje ljudske greške u okviru tehničkih rizika je ključno za poboljšanje sistema i procesa kako bi se minimizirala njena pojava i ublažile njene posledice. Strategije za smanjenje ljudske greške uključuju poboljšanu obuku i obrazovanje, pojednostavljenje procedura, negovanje kulture otvorene komunikacije i učenja na greškama, i implementaciju mehanizama za prijavljivanje grešaka za kontinuirano poboljšanje.

Kao i svi drugi rizici u rudarstvu, i ovaj je povezan sa nizom drugih rizika: geološkom neizvesnošću, ekološkim rizicima, socijalnim rizicima, bezbednosti i zdravljem na radu, rizicima zastoja, neprilikama, itd. Važna karakteristika tehničkih rizika u površinskoj eksploataciji je to što veliki broj događaja ima potencijal da dovede do havarije, budući da se radi o kompleksnim sistemima eksploatacije, čak i kad je manji površinski kop u pitanju, a pogotovo kad je veći.

#### **2.2.4. Bezbednost i zdravlje na radu**

Nesreća, odnosno nezgoda na radu je događaj tokom rada koji može dovesti do fizičke ili mentalne povrede, čiji rezultat može biti povreda, bolest ili u najgorem slučaju smrt. Površinska eksploatacija svakog pojedinačnog ležišta mineralnih sirovina, i rudarstvo generalno, je složen sistem

sa puno uticajnih faktora i učesnika tokom svih faza eksploatacije. Složenost bilo kog sistema dovodi u pitanje pouzdanost i sigurno vođenje i održavanje sistema bez ikakvih nesreća ili nezgoda. Nažalost, zbog te složenosti i uglavnom ljudske greške, rudarstvo je delatnost gde često može doći do povređivanja i neretko smrtnog ishoda zaposlenih u radnim zonama veće opasnosti.

Najveći rizici po bezbednost i zdravlje radnika u rudarstvu su [48]:

- Respiratorne opasnosti: izloženost štetnoj prašini, gasovima i dimovima, što može dovesti do respiratornih problema i bolesti,
- Padovi: rad na visini ili na neravnom terenu može predstavljati rizik od pada,
- Rudarska oprema: zaglavljivanje, upetljavanje, udari struje i polomljenih delova,
- Eksplozije i požari: pri korišćenju eksploziva i zapaljivih materijala može doći do eksplozija i požara,
- Izloženost buci: rudarska oprema generiše visok nivo buke, što može dovesti do gubitka sluha,
- Izloženost toksičnim supstancama,
- Vibracije, izloženost UV zracima na površinskim kopovima,
- Psihološki rizik.

Kina je država koja ima najveći broj zaposlenih u rudnicima na svetu. Na primer, autori Tian i drugi su radili analizu najvećih rizika od nezgoda na svim rudnicima uglja u Kini, gde je radilo 3,68 miliona radnika u 2019. godini. Saznali su da je najveći broj nezgoda proistekao iz uzroka po sledećem redosledu: nesreće povezane sa podgradom podzemnih radova, požari, eksplozije uglja i gasa, pa zatim elektromehaničke nezgode, nezgode povezane sa miniranjem, nezgode kod transporta, nezgode u vezi sa poplavama i druge [49]. Može se uočiti da prevladavaju nezgode karakteristične za podzemnu eksploataciju, dok na primer poplave prave veće probleme na površinskim kopovima.

Po fatalnim ishodima, rudarstvo je na desetom mestu od deset najopasnijih profesija na svetu [50]. Podaci koji se koriste za ovu listu su sakupljeni iz rudarskih kompanija u Sjedinjenim Američkim Državama, tako da se može zaključiti da su fatalni ishodi verovatno u još većem broju u državama u razvoju, i u državama gde i dalje postoji široko rasprostranjeno ilegalno rudarstvo (najpre se misli na zemlje u Africi, Latinskoj Americi, kao i Indija i Nigerija, koje su bogate rudama, sa visokim nivoom kriminala i značajnim prisustvom ilegalnog rudarstva). U Tabeli 2.2.4.1., mogu se videti podaci za fatalne ishode u površinskoj i podzemnoj eksploataciji od 2006. do 2010. godine u SAD-u.

**Tabela 2.2.4.1. Fatalni ishodi u površinskoj i podzemnoj eksploataciji od 2006. do 2010. godine [51]**

Godina	Podzemna eks.	Stopa u podzemnoj eks.	Površinska eks.	Stopa u površinskoj eks.
2006	37	66,0	36	14,6
2007	27	47,2	40	16,1
2008	20	32,0	32	12,9
2009	9	15,4	24	11,5
2010	46	73,9	24	11,2

Stopa se računa u odnosu na 100.000 stalno zaposlenih radnika u rudnicima. U Tabeli 2.2.4.1. se može primetiti da se broj fatalnih ishoda u površinskoj eksploataciji uglavnom nalazi na sličnim godišnjim stopama, dok u podzemnoj eksploataciji ima dosta variranja, pogotovo jer je zatvoren prostor ograničavajući faktor u slučaju nesreće tako da su veće verovatnoće da određen broj radnika ostane zarobljen.

U napomenutom izveštaju, u okviru podzemnih rudnika prijavljene su 2.243 nefatalne povrede, što je rezultiralo sa 148.592 dana izgubljenih na poslu. Ovo se upoređuje sa 3.380 nefatalnih povreda koje se pripisuju površinskoj eksploataciji, što je rezultiralo sa 194.322 dana izgubljenih na poslu [51]. U posmatranom periodu, u proseku površinska eksploatacija ima manji broj fatalnih ishoda u odnosu na podzemnu eksploataciju, ali veći broj nefatalnih povreda, što je rezultat dosta

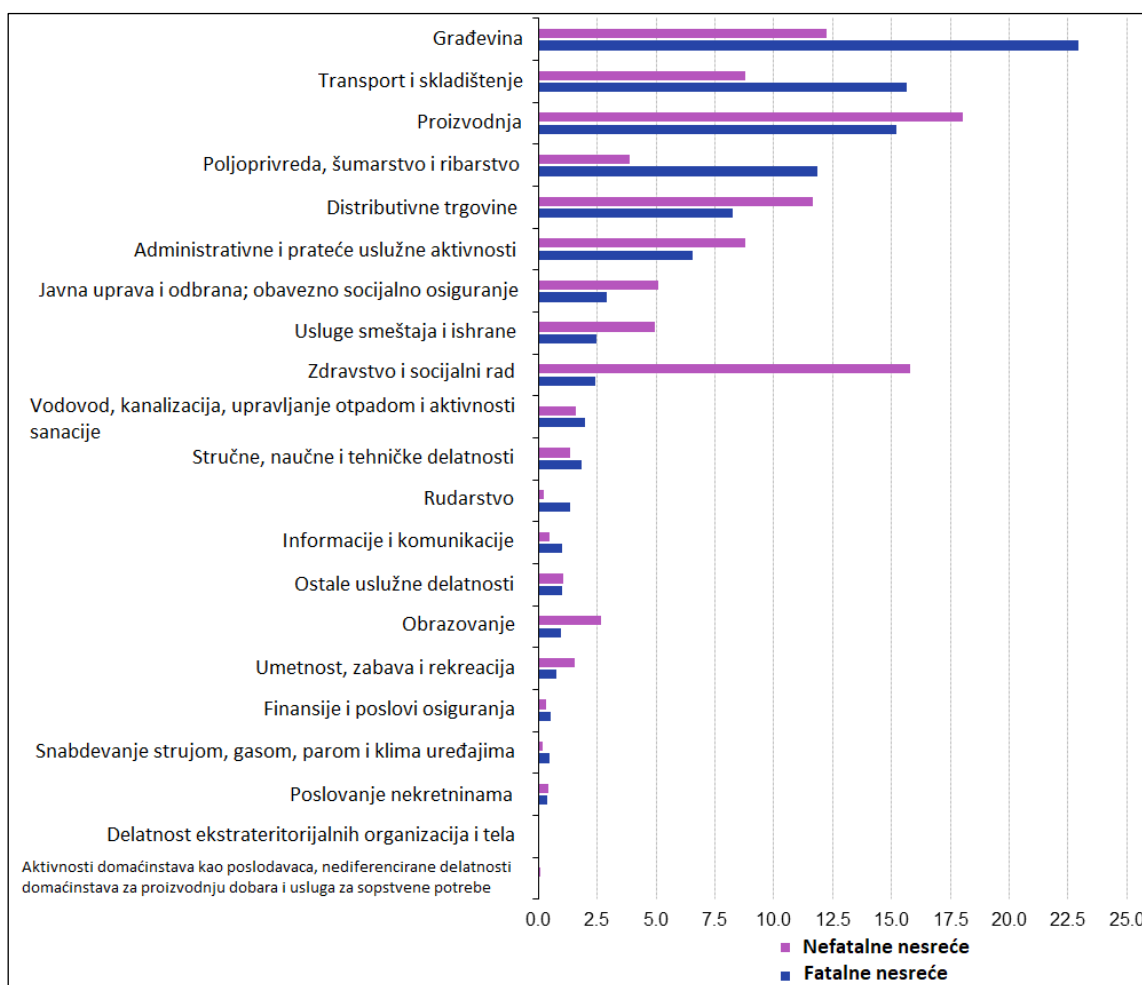
značajnije zastupljenosti površinskih kopova u odnosu na podzemne rudnike (u konkretnom slučaju 13.464 površinskih (94,3%) i 819 podzemnih (5,7%)) na svetu.

Zbog velikog broja napomenutih rizika po bezbednost i zdravlje zaposlenih, rudarska industrija daje veliku pažnju metodama poboljšanja sigurnosti radnih i okolnih zona na površinskim kopovima. Odgovor rudarske industrije na bezbednost značajno se promenio u poslednjim decenijama, i ignorisanje bezbednosnih pitanja više nije opcija pošto se rudarske kompanije smatraju odgovornim za svoje postupke. Sa napredovanjem tehnike i rastom posvećenosti smanjivanju rizika po radnike, u mnogim zemljama kao što su Sjedinjene Američke Države, Japan i Južnoafrička republika, se primećuje trend opadanja fatalnih ishoda u rudarstvu [52][53][54]. Autor de Jager je prikazao da je u Južnoafričkoj republici broj smrtnih slučajeva smanjen sa 219 godišnje u 2007. na 73 godišnje u 2016. godini, što je značajno poboljšanje od 67% [52], iako nije tačno ustanovljeno da li je broj opao zbog veće sigurnosti.

Nestručan operativni rad sa rudarskom opremom je inače istorijski najveći uzrok fatalnosti u rudarstvu [53], ali problem visoke stope povreda u današnjim rudarskim kompanijama je pogoršan činjenicom da u toku njihove modernizacije preduzeća uvode produktivniju i tehnički složeniju opremu koja može izazvati povrede. Takođe, ovo opterećuje rudare, što dovodi do povećanja kako težine povreda na radu, tako i dužine perioda oporavka. U takvom kontekstu, upravljanje ljudskim faktorom postaje sve važnije, o čemu svedoči sve veći udeo nesreća izazvanih direktno od samih žrtava [55]. Ljudski faktori radnika prvenstveno su podeljeni u tri kategorije: individualne karakteristike, psihičko stanje i fiziološko stanje [49][56]. Procenjeno je da je povećanje rizika od povreda asocirano sa dužim radnim satima, odnosno što su duže smene, to je veći rizik od nezgode sa padom koncentracije [49].

Zbog velike odgovornosti koju rudarske kompanije imaju i sve veće pažnje koja se posvećuje smanjenju nesreća i povreda na radu u rudarstvu, primećuje se i rast broja istraživanja u oblasti bezbednosti i zdravlja na radu u poslednjih par decenija [57]. Autori Naeini i Badri su prikupili i analizirali sve postojeće radove u ovoj oblasti, i zaključili da je faza eksploatacije, odnosno rad rudnika pri punom kapacitetu, jedina faza u rudarskom projektu u kojoj postoje opasnosti po bezbednost i zdravlje na radu u svim kategorijama opasnosti. Jasno je da u poređenju sa fazom eksploatacije, faza istraživanja, otvaranja i zatvaranja rudnika sa rehabilitacijom imaju manje kategorija koje su opasne po radnike u rudnicima, imajući u vidu umanjeni nivo rudarskih aktivnosti i radne snage.

Globalna realizovana stalna poboljšanja u oblasti rudarstva dovode do sve prihvatljivijeg stanja nesreća na radu u odnosu na sve druge privredne aktivnosti u Evropskoj uniji. Prema podacima Eurostat-a iz 2024. godine o fatalnim i nefatalnim nesrećama na radu po vrstama aktivnosti u Evropskoj uniji za 2022. godinu (Slika 2.2.4.1.), procenat nesrećnih slučajeva u rudarstvu je relativno mali sa samo oko 1.5% fatalnih i oko 0.02% nefatalnih nesreća [58].



Slika 2.2.4.1. Nesreće sa smrtnim ishodom i nesreće na radu prema NACE sektiji, EU, 2022 (% nesreća sa smrtnim i bez smrtnog ishoda) [58]

Međutim, iako su nesreće u rudarstvu zanemarljive u poređenju sa mnogim drugim industrijama i oblastima, posmatrajući rudarstvo izolovano u smislu poboljšanja upravljanja tokom vremena, statistike o velikim nesrećama kao što su smrtni slučajevi i incidenti o kojima se izveštava u rudarstvu nisu pokazale zadovoljavajuće nivoe poboljšanja u odnosu na prošlost.

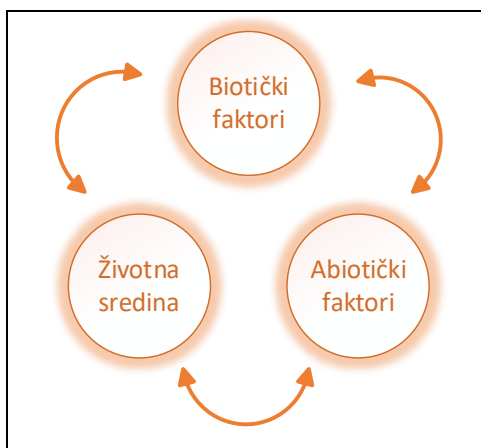
Davanje prioriteta zdravlju i bezbednosti u rudnicima zahteva sveobuhvatan održivi pristup koji uključuje proaktivno upravljanje rizikom, adekvatnu obuku, efikasne kontrole i posvećenost kontinuiranom poboljšanju kako bi se obezbedila dobrobit svih radnika u rudarskoj industriji. Uprkos brojnim teškoćama koje su karakteristične za površinsku eksploataciju mineralnih sirovina, primećuje se konstantan napredak u oblasti bezbednosti i zdravlja na radu, i u budućnosti je potrebno tome posvetiti stalnu pažnju radi poboljšanja bezbednosti radnika, unapređenja načina rada i radne discipline.

### 2.2.5. Ekološki rizici

Ekologija je nauka koja proučava veze između biotičkih (živih organizama) faktora, abiotičkih (neživih) faktora i njihovih uticaja na životnu sredinu (Slika 2.2.5.1.). Jedan od biotičkih faktora su i antropogeni faktori, odnosno uticaj čoveka na životinjske vrste, biljne vrste i životnu sredinu. Često se govori o antropogenim faktorima kao zasebnim faktorima zbog ogromnog uticaja ljudi na planetu i njene ekosisteme, ali suštinski antropogeni faktori pripadaju uticaju živih bića, odnosno biotičkim faktorima.

Ekologija se bavi proučavanjem funkcionisanja ekosistema, prilagođavanje životinja svom okruženju i složenim odnosima koji omogućavaju život na Zemlji. Ta nauka analizira dinamiku populacija, protok energije i kruženje hranljivih materija kako bi se bliže razumeli i definisali uticaji

ljudskih aktivnosti na biodiverzitet i prirodne sisteme. Ova naučna disciplina pruža važne uvide za očuvanje staništa, rešavanje ekoloških problema i poboljšanje zdravog suživota između ljudi i planete kroz istraživanje obrazaca i odnosa u prirodi.



Slika 2.2.5.1. Uzročno-posledične veze u ekologiji

Termini ekologija i zaštita životne sredine se često koriste u istom značenju, ali ekologija je generalno sveobuhvatniji termin jer podrazumeva odnose između živog, neživog i životne sredine, a zaštita životne sredine se odnosi samo na protekciju životne sredine. Zaštita životne sredine se može definisati kao smanjenje uticaja antropogenih faktora na životnu sredinu, za šta je potrebno dobro razumevanje ekologije.

Površinski kopovi su jedan od antropogenih uticajnih faktora na biljne vrste, životinjske vrste i životnu sredinu. Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina neizostavno ima uticaj na životnu sredinu i ekosistem na lokalitetu i okruženju površinskog kopa u manjoj ili većoj meri, u zavisnosti od veličine površinskog kopa, pozicije površinskog kopa i potrebe za potencijalnim spoljašnjim odlagalištima i jalovištima. Imajući u vidu da je površinska eksploatacija fizičko otkopavanje otkrivke i mineralne sirovine, jasno je da je nemoguće da nema određenog uticaja na životnu sredinu.

Površinski kop se može predstaviti kao prirodno-tehnički ekosistem sa vezom i međusobnim uticajem prirodnog podsistema kao eksternog faktora i tehničkog/rudarskog podsistema kao internog faktora, koji obuhvata, pored kopa u užem smislu, i infrastrukturu, objekte i upravljanje uključujući potrebe za mineralnom sirovinom. Koncept i principi analize ovako postavljenog složenog ekosistema u oblasti održive površinske eksploatacije obuhvataju analizu uzajamnih uticaja negativnih ekoloških procesa prirodnog i tehničkog podsistema, uz utvrđivanje verovatnoća pojave negativnih stanja kao i ekoloških i proizvodnih ekonomskih posledica promenljivih u vremenu.

Prema ISO 14001:2015, organizacija mora da odredi aspekte životne sredine svojih aktivnosti, proizvoda i usluga, kojima može da upravlja i one na koje može da utiče, kao i sa njima povezane uticaje. Takođe mora da uspostavlja ciljeve životne sredine na relevantne funkcije i nivoe; uzimajući u obzir značajne aspekte životne sredine organizacije i odgovarajuće obaveze za usklađenost, i razmatrajući svoje rizike i prilike [59].

Sa porastom kolektivne međunarodne svesti o ekologiji i posebno antropogenim uticajnim faktorima, porastao je i fokus na rudarstvo, a pogotovo na površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina, koja ima veće vizuelno dejstvo u odnosu na podzemnu eksploataciju, buduće da se vidno otkopavaju znatne količine otkrivke. Usvojeni su jasni zakoni i podzakonska akta u cilju zaštite životne sredine, pa se rudarstvo prilagodilo strožim uslovima eksploatacije u odnosu na prethodne decenije. Mnogi standardi i priručnici za procese vrednovanja uticaja na životnu sredinu (engl. *Environmental Impact Assessment* - IEA) predstavljaju integralni deo planiranja, razvoja i upravljanja mnogim privrednim aktivnostima, uključujući rudarsku industriju. Zahtevi EIA za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina su dati u odgovarajućim regulatornim propisima (engl.

*Exploitation Regulations*). Osnovni međunarodni standardi za vrednovanje ekoloških uticaja dati su u Tabeli 2.2.5.1.

**Tabela 2.2.5.1. Osnovni međunarodni standardi za vrednovanje ekoloških uticaja**

Naziv	Svrha/opis	Delokrug
<b>ISO 14001:2018</b> <b>Environmental management system (EMS)</b> <i>Sistemi upravljanja zaštitom životne sredine</i>	ISO 14001 identifikuje aspekte uticaja organizacije na životnu sredinu i kroz njegovu primenu pomaže da se negativni uticaji smanje i kontrolišu. Obuhvata i potrebu za <b>stalnim poboljšavanjem sistema organizacije</b> i pristupa problemima životne sredine.	Implementacija sistema upravljanja zaštitom životne sredine se može primeniti na celu organizaciju, jedan njen deo ili jedan radni proces. Definiše politiku očuvanja životne sredine i upravljanje rizicima.
<b>ISO 50001</b> <b>Energy management Sistem upravljanja energijom</b>	ISO 50001 određuje zahteve za uspostavljanje, implementaciju, održavanje i unapređenje sistema menadžmenta energijom i omogućava organizaciji da prati sistematski pristup u postizanju kontinuiranog poboljšanja energetske efikasnosti, sigurnosti, potrošnje i troškova. Standard se lako integriše sa Sistemom menadžmenta kvalitetom ISO 9001 (QMS) i Sistemom menadžmenta životnom sredinom ISO 14001 (EMS)	Primenljiv za svaku organizaciju bez obzira na veličinu, delatnost ili geografsko područje. Definiše politiku energije i upravljanje rizicima. Definiše energetske ciljeva, akcione planove i odgovornost rukovodstva.
<b>ISO 2230:2019</b> <b>Business continuity management systems</b> <i>Sistemi upravljanja kontinuitetom poslovanja</i>	ISO 22301 identifikuje potencijalne spoljne i unutrašnje pretnje koje mogu ugroziti organizaciju. Osigurava od potencijalnih incidenata i smanjuje verovatnoću njihove pojave. Lako može da se integriše sa ostalim standardima kao što su ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, ISO/IEC 27001, itd.	Definiše strategiju kontinuiteta poslovanja i proces analize uticaja na poslovanje i procenu rizika. Omogućava umanjene vremena zastoja tokom incidenata i ubrzanje vremena oporavka.
<b>ISO 45001:2018</b> <b>Occupational health and safety management systems</b> <i>Sistemi upravljanja bezbednošću i zdravljem na radu</i>	ISO 45001 definiše zahteve i daje uputstva za bezbedna i zdrava radna mesta, sprečavanje povreda na radu i narušavanja zdravlja. Proaktivno poboljšava funkcionisanje sistema menadžmenta.	Omogućava procene rizika, povećanje efikasnosti, bezbednosti i smanjenje broja povreda na radu i narušavanja zdravlja.
<b>ISO/IEC 17020</b> <b>Conformity assessment systems for the operation of bodies performing inspection</b> <i>Sistem za kompetentnost tela koja obavljaju kontrolisanje</i>	ISO/IEC 17020 precizira uslove za nepristrasnost i konzistentnost aktivnosti kompetentnih tela za kontrolu usaglašenosti sa propisima, standardima, specifikacijama i ugovorima.	Pokazuje da je željeni nivo kvaliteta postignut i da se održava, čime se poboljšavaju poslovne sposobnosti i zadovoljavaju zahtevi i očekivanja klijenata.
<b>ISO 21795</b> <b>Mine closure and reclamation planning</b> <i>Planiranje zatvaranja i rekultivacije rudnika</i>	ISO 21795 daje zahteve i preporuke i obuhvata i priručnik za korišćenje standarda za planiranje integrisanog zatvaranja i rekultivacije rudnika tokom životnog veka u svim fazama razvoja uključujući posteksploatacioni period. Omogućava efikasnu kontrolu efekata tehničke i biološke rekultivacije i zaštite podzemnih voda.	Omogućava integrisano odgovorno upravljanje uspešnim procesima zatvaranja i rehabilitacije sa visokim stepenom ekološke i socijalne odgovornosti. Definiše vrednovanje i upravljanje rizicima.

Uslovljenost specifičnim pravilima za eksploataciju i graničnim zagađenjima vazduha, vode i zemljišta radi zaštite životne sredine predstavlja ozbiljan izazov u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina. Dokaz da je uticaj na životnu sredinu trenutno najveća briga u rudarskoj industriji je činjenica da su ekološki rizici izglasani kao najveći rizik u rudarstvu u 2024. godini [27]. Međutim, budući da su potrebe za snabdevanjem mineralnim sirovinama sve veće zbog rasta broja stanovnika

i planirane energetske tranzicije, rudarstvo mora napredovati sa sve manjim uticajem na životnu sredinu zbog društvenih i zakonskih pritisaka.

Pre početka eksploatacije, potrebno je napraviti pristupne puteve ukoliko već ne postoje, očistiti lokalitet za izgradnju neophodnih postrojenja za pripremu mineralnih sirovina, opremu i prateću infrastrukturu. Potom sledi početak same eksploatacije, uklanjanjem vegetacije, odnosno humusnog sloja tla radi otkopavanja otkrivke. Pored prethodno napomenutih zauzetih površina, takođe je neophodno formirati spoljašnje odlagalište, koje ponekad može biti privremenog karaktera, za odlaganje velike količine otkrivke i jalovine, u većini slučajeva. Zbog najčešće velikih dubina površinskih kopova (osim u slučajevima malih brdskih kopova), kontura obično zalazi ispod nivoa podzemnih voda, što takođe stvara potrebu za odvodnjavanjem radi održavanja suvih uslova rada u kopu. Mehanizacija koja je neophodna za otkopavanje otkrivke, mineralne sirovine i za pomoćne radove ima sopstven nepovoljni uticaj na radnu i životnu sredinu u vidu izduvnih gasova. Sve ove radnje kreiraju uslove u kojima postoje brojni ekološki direktni uticaji antropogenih faktora na radnu i životnu sredinu koji su prikazani na Slici 2.2.5.3.

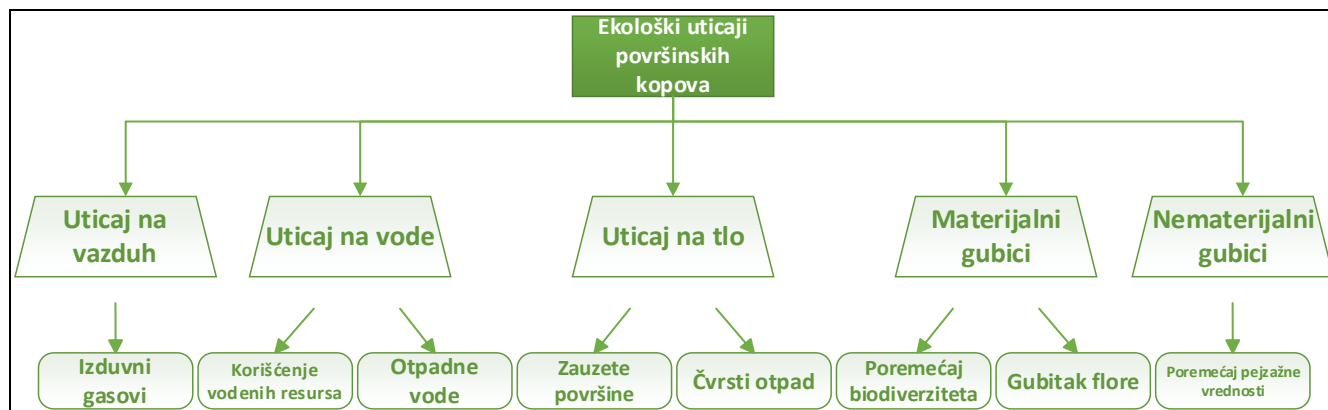
Uticaji površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina odnose se na:

- vodu,
- vazduh,
- tlo,
- životinjski i biljni svet,
- ljude.

Navedeni uticaji u manjoj ili većoj meri predstavljaju rizike po površinsku eksploataciju, po vlasnika ili kompaniju, i najočiglednije posmatrajući sa strane: rizike po životnu sredinu. Međusobni uticaj površinskog kopa, životne sredine, ljudi, biljnog i životinjskog sveta u ovom slučaju predstavlja ekološke rizike. Ekološki rizici su, kao i svi drugi rizici u sistemu eksploatacije, povezani sa drugim vrstama rizika koji su obuhvaćeni u ovom poglavlju.

Evropska banka, koja ima veliko iskustvo kada su u pitanju investicije u rudarstvo u Evropi, definisala je rizike životne sredine kao privremene ili trajne promene pejzaža, atmosfere, tla, vode, biljaka ili životinja izazvane ljudskim aktivnostima [60]. Kao nezamenjivi deo industrije, ljudskog razvoja i imajući u vidu načine otkopavanja, odnosno vađenja mineralnih sirovina, rudarstvo je specifična industrija sa specifičnim uticajima. Rudarske aktivnosti imaju direktne i indirektno uticaje na životnu sredinu u različitim prostornim razmerama. Uticaji specifični za lokaciju i regionalni uticaji značajno variraju u zavisnosti od lokalnih karakteristika životne sredine, vrste rudarske aktivnosti, geologije i rude koja se iskopava [61].

Jasno je da različite faze eksploatacije imaju drugačije uticaje na ekosistem, sa varijabilnim nivoima uticaja u zavisnosti od vrste i intenziteta rada. Početne faze rada u eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, kao što su geološka istraživanja i priprema terena za površinski kop i prateću infrastrukturu, imaju jako male uticaje na životnu sredinu, ali mogu imati veliki uticaj sa socijalnog aspekta [61][62].

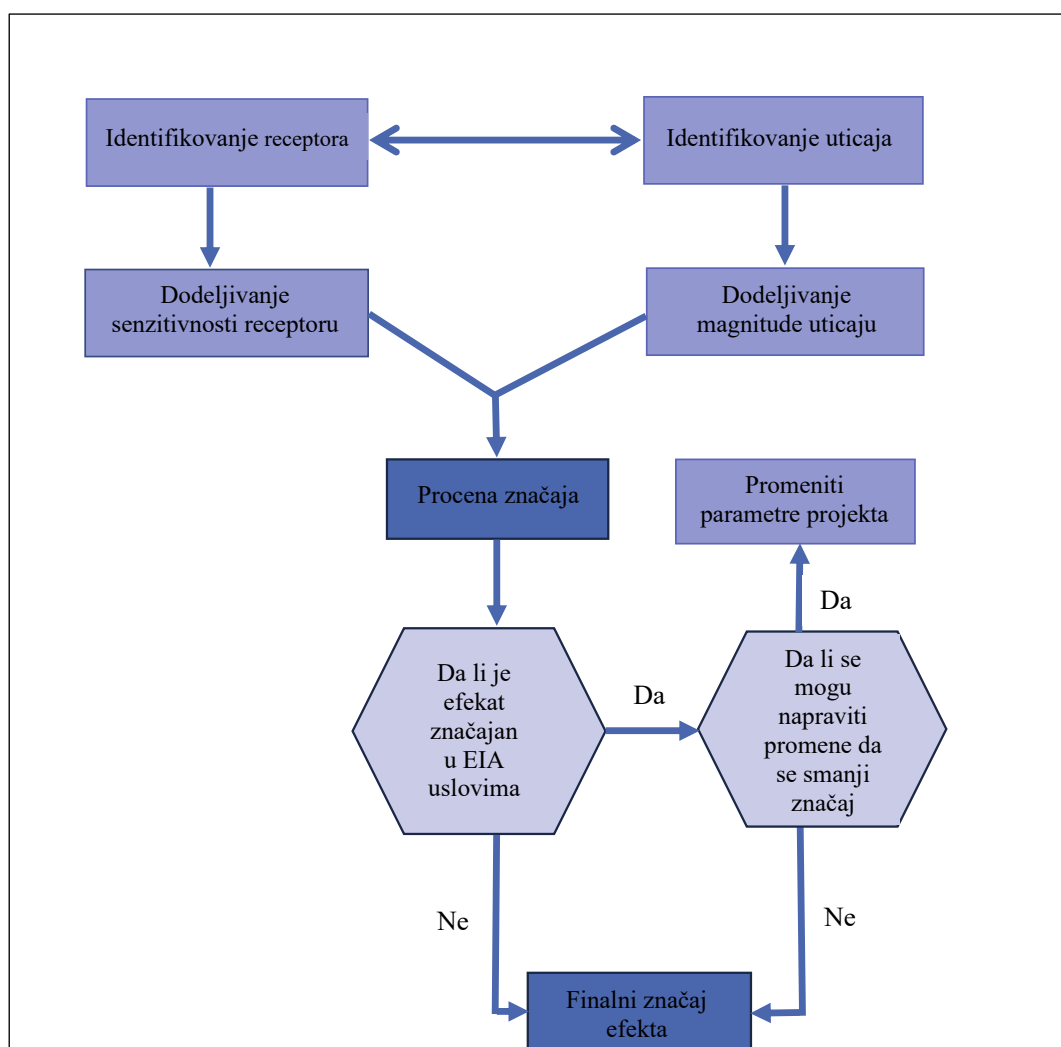


Slika 2.2.5.3. Ekološki uticaji površinske eksploatacije [63]

Teško je uopštiti sve detaljne direktne i kumulativne ekološke uticaje površinske eksploatacije, pa je svakako korisno definisati osnovne kategorije sa modalitetima potencijalnog uticaja imajući u vidu naročito promenljivost ekološkog stanja u vremenu. Zbog toga je potrebno rešiti mnoge dileme uticaja eksploatacije, uključujući i odlučivanje o najboljem korišćenju zemljišta u završnom okonutenom otkopanom prostoru površinskog kopa pri integralnoj rehabilitaciji. Jedan od detaljnijih načina prikaza detalja direktnih uticaja površinske eksploatacije na životnu sredinu, odnosno, na promene ekoloških uslova ekosistema, koji se odnosi kako na negativne efekte buke, uticaj zagađenja vode na plodni sloj, vegetaciju i životinjski svet, tako i dodatno na korišćenje zemljišta i ekonomske i sociološke efekte na lokalno stanovništvo i funkcionisanje rudnika.

Kumulativni ekološki uticaj se javlja u slučajevima kada se u istom regionalnom prostoru eksploatacija vrši na više površinskih kopova. Tada se realizuje zbirni rast i kombinovani negativni efekat površinske eksploatacije. Kumulativni uticaji mogu biti pozitivni sa socijalnog aspekta, tako da praktično imaju direktne i indirektno uticaje.

Postoji mnogo faktora koji treba obuhvatiti za procenu ekološkog uticaja svakog negativnog uzroka. Značaj uticaja se može utvrditi na osnovu njegove veličine u odnosu na osetljivost ugroženog elementa (engl. *receptor*). Usaglašavanje odnosa nivoa negativnog uticaja nekog uzroka i ekološke osetljivosti prema EIA, najefikasnije se metodološki postiže iterativnim postupkom (Slika 2.2.5.4).



Slika 2.2.5.4. Iterativni postupak vrednovanja nivoa negativnog uticaja uzroka i ekološke osetljivosti

Ekološki uticaji površinskog kopa na životnu sredinu takođe umnogome zavise od mineralne sirovine koja se otkopava, zbog jedinstvenih karakteristika svih mineralnih sirovina i radnih sredina u kojima se nalaze.

Jedan od značajnih faktora uticaja na životnu sredinu u slučaju rudarstva, odnosno površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, je upravo odlaganje otpada. Pri eksploataciji postoje dve glavne vrste otpada: čvrsti i kompaktni materijali (stene, sedimenti ili zemlja) koji se otkopavaju kao otkrivka na površinskim kopovima, i jalovina stvorena procesom koncentracije rude, tj. pripremom mineralnih sirovina. Za odlaganje otkrivke formiraju se spoljašnja i unutrašnja odlagališta, u zavisnosti od mogućnosti korišćenja konture kopa za odlaganje pri napredovanju, odnosno u zavisnosti od pravca širenja kopa. Za odlaganje jalovine iz procesa pripreme mineralnih sirovina se formiraju jalovišta (ili hidroodlagališta). Za formiranje nasipa jalovišta se najčešće koristi i određena količina otkrivke. Obe vrste objekata za odlaganje rudarskog otpada veoma značajno utiču na životnu i radnu sredinu, te se moraju ozbiljno posmatrati sa aspekta ekoloških rizika i sa aspekta pravilnog upravljanja rudarskim objektima.

#### 2.2.5.1. Uticaji na vodu

Uticaji površinske eksploatacije na kvalitet vode i dostupnost vodenih resursa su uglavnom najproblematičniji od svih drugih uticaja. Ključno pitanje je da li kvalitet površinskih i podzemnih voda ostaje pogodan za korišćenje nakon zatvaranja površinskog kopa, posebno ukoliko je bio pogodan pre eksploatacije. Drugi aspekt uticaja na vode je mogućnost nastavljanja normalnog biljnog i životinjskog sveta unutar vodenih ekosistema, i oko njih.

Potencijalni rizici površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina na vode mogu biti sledeći [64]:

- povlačenje štetnih hemijskih elemenata i jedinjenja odvodnjavanjem iz eksploatacione zone kopova,
- erozija zemljišta i rudarskog otpada u površinske vode,
- uticaj odlagališta, jalovišta i postrojenja za pripremu mineralnih sirovina,
- promena nivoa podzemnih voda odvodnjavanjem i hidrogeologijom.

Stvaranje kiselih voda je karakteristično kod eksploatacije metalnih ruda. Do stvaranja kiselih voda dolazi pri kontaktu otkopanih materijala (otkrivka, jalovina) sa kiseonikom i vodom, kada se može formirati kiselina ako minerala gvožđe sulfida (najčešće pirita) ima u izobilju i nema dovoljno materijala za neutralizaciju da bi se sprečilo stvaranje kiseline. Kiselina će izlučiti ili rastvoriti metale i druge zagađivače iz rudarskih otpada i formirati rastvor koji je kiseo, sa visokim sadržajem sulfata i bogat metalima (uključujući povišene koncentracije kadmijuma, bakra, olova, cinka, arsena itd.) [64]. Odobrenje za eksploataciju od strane vlade uglavnom zavisi od mogućnosti i nivoa kontrolisanja ovog značajnog uticaja.

Zbog narušenog materijala otkopavanjem, na odlagalištima i jalovištima postoji realan rizik od erozije. Erozija i sedimentacija rudarskog otpada u površinske vode ima potencijal da zagadi površinske vode teškim metalima i drugim supstancama.

Uticaji odlagališta, postrojenja za pripremu mineralnih sirovina i posebno flotacijskih jalovišta imaju drugi najveći značaj kada su u pitanju uticaji površinskih kopova na površinske i podzemne vode, jer njihov uticaj može biti znatno veći u poređenju sa drugima, čak ne računajući havarije. Šteta može da nastane pri oticanju toksičnih supstanci ispod ovih objekata u podzemne vode, posebno ako objekti za odlaganje jalovine iz pripreme mineralnih sirovina nisu dobro izolovani i obloženi zaštitnom geomembranom. Rezultat oticanja je kontaminacija podzemnih voda i automatski površinskih voda, zbog međusobne povezanosti. Jalovišta i industrijske oblasti su karakteristične po potencijalnoj kontaminaciji podzemnih i površinskih voda, kao što su ustanovili autori Carlig i drugi ispitujući industrijsku oblast Cordun-Roman u Rumuniji [65]. Ako se sa jalovištima postupa u skladu sa najstrožim ekološkim i inženjerskim standardima po pitanju stabilnosti i oblaganja geomembranom, ne bi trebalo da postoji značajan rizik od kontaminacije voda. Međutim, ako jalovište nije obloženo, ako nije dobro projektovano, ako se odlažu veće mase od predviđenih na tom objektu, ili ako dođe do većih nepredviđenih vremenskih neprilika pri projektovanju, uticaj na podzemne vode će biti znatan, posebno ako dođe do probijanja kroz zaštitni nasip. Katastrofalne havarije jalovišta predstavljaju veoma opasan rizik zbog izvesnog oticanja mulja sa jalovišta, koje

zatim ima potencijal da zagađi okolne površinske vode, i zbog ozbiljnih količina materijala koji se kreće ogromnom silom koja ima snagu da ruši i zatrpava okolne infrastrukture i ekosisteme. To nisu česti događaji, iako su na primer autori Carmo i drugi pokazali da se u Brazilu dogodi havarija jalovišta u proseku svake tri godine. Pritom treba uzeti u obzir da u Brazilu postoji 839 registrovanih jalovišta kao rezultat eksploatacije više od 40 tipova ruda [66]. To pokazuje da upravljanju jalovištima treba ozbiljno pristupiti, imajući katastrofalne rizike u vidu i vodeći računa uz pomoć monitoringa da je jalovište trajno stabilno sa projektovanom količinom materijala za odlaganje, od koje nikako ne treba odstupati količinski bez ozbiljnog preispitivanja projekta.

Odvodnjavanje površinskih kopova u većini slučajeva spada u nezaobilazne tehnološko-inženjerske procese pri površinskoj eksploataciji, prvenstveno radi zaštite površinskih kopova i odlagališta od podzemnih i površinskih voda, zbog neophodnosti rada u suvim uslovima. Značajan uticaj odvodnjavanja je promena nivoa podzemnih voda, što može uticati na izdani i bunare u okolini.

Pri odvodnjavanju se stvaraju veće ili manje depresije podzemnih voda, u zavisnosti od dubine bunara, tj. od dubine površinskog kopa i samim tim potreba odvodnjavanja. Zbog sve većih potreba za doseganjem ležišta mineralnih sirovina na većim dubinama, površinski kopovi se sve više produbljuju i time uslovljavaju veće izazove odvodnjavanja, veće depresije i sve značajne količine vode koje se ispumpavaju iz zone kopa.

Autori Loupasakis i drugi su dokazali na primeru grčkog površinskog kopa lignita Amintajon (Amyntaion) da dugoročno odvodnjavanje vodonosnih geoloških slojeva od 2005. godine uzrokuje ozbiljne pojave sleganja tla, koji se prostiru i 3-4 km oko zone kopa, što je napravilo štetu u dva okolna sela. Konus depresije stvorene odvodnjavanjem u ovom konkretnom slučaju je 50 m dubok. Neravnomerno oticanje podzemne vode unutar konusa uzrokuje diferencijalne deformacije i površinske pukotine, na koje takođe utiče regionalna tektonika [67]. Slične depresije se mogu očekivati kod mnogih velikih površinskih kopova.

#### *2.2.5.2. Uticaji na vazduh*

Emisije u vazduh su neizostavna pojava pri površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, pogotovo u fazi eksploatacije. Otkopavanje, transport velikih količina rastresitog materijala i izduvni gasovi brojne rudarske mehanizacije zajednički stvaraju velike količine prašine i izduvnih gasova u zoni rada kopa, koje zatim vetar raznosi ka okolnim zonama.

Postoje dva glavna uticajna faktora; prvi je dizanje prašine pri otkopavanju, transportu, kretanju mehanizacije, iz postrojenja za pripremu mineralnih sirovina, takođe sa deponija i odlagališta, a drugi je emisija štetnih gasova od strane osnovne i pomoćne mehanizacije, eksplozija i generalno svih elemenata koji koriste sagorevanje goriva. Na primer, pored emisija prašine, na površinskim kopovima Kolubarskog basena rudarska oprema i transportna sredstva dominantno emituju štetne gasove ( $\text{NO}_x$ , CO,  $\text{SO}_2$ ) i isparljiva organska jedinjenja (VOC).

Autori Coelho i drugi su pokazali da je kontaminacija na lokaciji zatvorenih podzemnih rudnika zlata Jales imala uticaj na zdravlje zajednice. Stanovnici Kampo de Jalesa imaju naznake o većoj izloženosti kadmijumu i olovu. Međutim, rezultati su pokazali da su nivoi izloženosti manji nego što je bilo predviđeno na osnovu procene kontaminacije lokacije koja je obavljena 1997. godine. Ovo se može objasniti preventivnim merama koje su preduzete od tada – postavljanjem javnog vodovoda i nadzorom kvaliteta vode. Ispitanici koji se nalaze u blizini napuštenih rudnika Jales imaju više pritužbi, sa prisutnim iritacijama oka i sluzokože i respiratornim simptomima. Ovi simptomi mogu nastati usled rasprostranjenja prašine sa jalovišta [68]. Imajući u vidu da je ispitivanje vršeno u oblasti davno zatvorenih podzemnih rudnika, može se očekivati da aktivni, veoma mehanizovani površinski kopovi imaju značajno više emisija u vazduh, ali na znatno većem prostoru sa cirkulacijom vazduha i zbog toga sa manjom mogućom koncentracijom štetnih gasova.

Takođe je važno napomenuti pri ovakvim istraživanjima je da stari rudnici nisu vodili računa o bilo kakvim ekološkim standardima (koji u to vreme nisu bili relevantni), što je znatno promenjeno u današnjem pristupu održivog upravljanju procesima na rudnicima, odlagalištima i jalovištima, gde se vodi računa o sprečavanju bilo kakvih štetnih ekoloških uticaja.

Pored emisija u vazduh, značajni uticaji karakteristični za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina su buka i vibracije. Buka se stvara prilikom rada mehanizacije na utovaru, istovaru, kretanju, i može uzrokovati probleme sa sluhom zbog stalne izloženosti. Vibracije se predominantno javljaju pri miniranju, i mogu potencijalno uticati na okolnu infrastrukturu i stabilnost kosina površinskih kopova. Prilikom izrade studije, treba uzeti u obzir da je moguće da potresi uzrokovani miniranjem potencijalno oštete infrastrukturu u okolini kopa, ukoliko je miniranje tehnološki neophodno, a infrastruktura postoji u neposrednoj blizini površinskog kopa i u zoni rizika [69][70]. Iz ekoloških razloga, često se koriste i specifične tehnologije i mehanizacija za otkopavanja čvrstih stena.

Zbog emisija u vazduh i klimatskih promena, većina velikih rudarskih kompanija se obavezala na dekarbonizaciju svojih operacija, kao što se vidi u obećanju 27 članova Međunarodnog saveta za rudarstvo i metale iz 2021. da će postići nultu emisiju obima 1 i 2 do 2050. godine ili ranije [71]. Tako je sve prisutnija mera za smanjenje uticaja na vazduh u modernom rudarstvu uvođenje električne opreme. Elektrifikacija u rudarstvu je transformativni korak ka održivosti koji je opšteprihvaćen. Osim usvajanja baterijskih električnih vozila (BEV), obično zahteva razmatranje čitavog sistema infrastrukture kao što su proizvodnja energije, mreža, sistemi baterija, održavanje i reciklaža [72]. Ostvaren je brz napredak u elektrifikaciji, u naprednim rudnicima koji već koriste ili planiraju da uvedu ukupno 352 kamiona sa baterijskim ili hibridnim tehnologijama. Ali izazovi ostaju – oni zahtevaju napredak u oblastima kao što su kapacitet baterije i sistemi za punjenje u vozilu, zajedno sa inovacijama koje uključuju i starije tehnologije [71].

### 2.2.5.3. Uticaji na tlo

Pri površinskoj eksploataciji je u većini slučajeva, pored uklanjanja humusnog sloja, potrebno je uklanjanje pozamašnih masa otkrivke, i samim tim se površine zauzete eksploatacijom ne mogu koristiti ni za kakvu drugu namenu dok se površinski kop ne zatvori i ne rehabilituje i rekultiviše.

Neosporno je da površinska eksploatacija utiče na prethodno neometano stanje tla otkopavanjem i pratećim radnjama, kao i da postoji potencijal da dođe do kontaminacije tla teškim metalima zbog oticanja zagađenih rudarskih voda ili oticanja sitnijih komponenta odlagališta i jalovišta.

Kontaminiranost tla teškim metalima je dokazano na dosta primera [73][74][75]. Autori Akbar i drugi, utvrdili su na primeru velikog ležišta uglja u Pakistanu gde postoji 257 aktivnih rudnika uglja, da su prosečne koncentracije kadmijuma ( $Cd^{+2}$ ), hroma ( $Cr^{+2}$ ), bakra ( $Cu^{+2}$ ), mangana ( $Mn^{+2}$ ), nikla ( $Ni^{+2}$ ), olova ( $Pb^{+2}$ ) i cinka ( $Zn^{+2}$ ) u uzorcima površinskog i potpovršinskog sloja tla veće od granica po propisima koje je odredila Svetska zdravstvena organizacija (SZO). Uzorci su uzimani na dve dubine, na udaljenostima od 50, 100 i 200 metara od rudarskih objekata. Prosečan nivo  $Cr^{+2}$  u uzorcima zemljišta bio je niži od dozvoljenog. Kod uzorkovanih biljnih vrsta (*Prosopis* spp., *Justicia* spp. i pšenice) prosečna koncentracija toksičnih teških metala je bila u sigurnim granicama, osim  $Cd^{+2}$  i  $Cr^{+2}$ . Takođe je ustanovljeno da koncentracija teških metala opada sa dubinom [76]. Mana ovih vrsta istraživanja je u mnogim slučajevima nedostatak uzoraka nultog stanja pre same površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, radi poređenja aktuelnih uzoraka sa uzorcima pre eksploatacije na datoj lokaciji. Mnogi masovni površinski kopovi su otvoreni pre razvitka svesti o zaštiti životne sredine i generalno monitoringu u rudarstvu, i samim tim ne postoje uzorci nultog stanja za poređenje sa trenutnim stanjem.

Takođe postoje ozbiljni rizici od geoloških hazarda pri eksploataciji ležišta mineralnih sirovina, odnosno različitih vrsta klizišta i slučajnog toka jalovinskog materijala [77].

Kao što je ranije napomenuto kod posledica odvodnjavanja, može doći i do sleganja tla u zonama oko površinskog kopa zbog promene nivoa podzemnih voda, što može prouzrokovati štetu po eventualne okolne građevine, objekte, puteve ili poljoprivredna zemljišta.

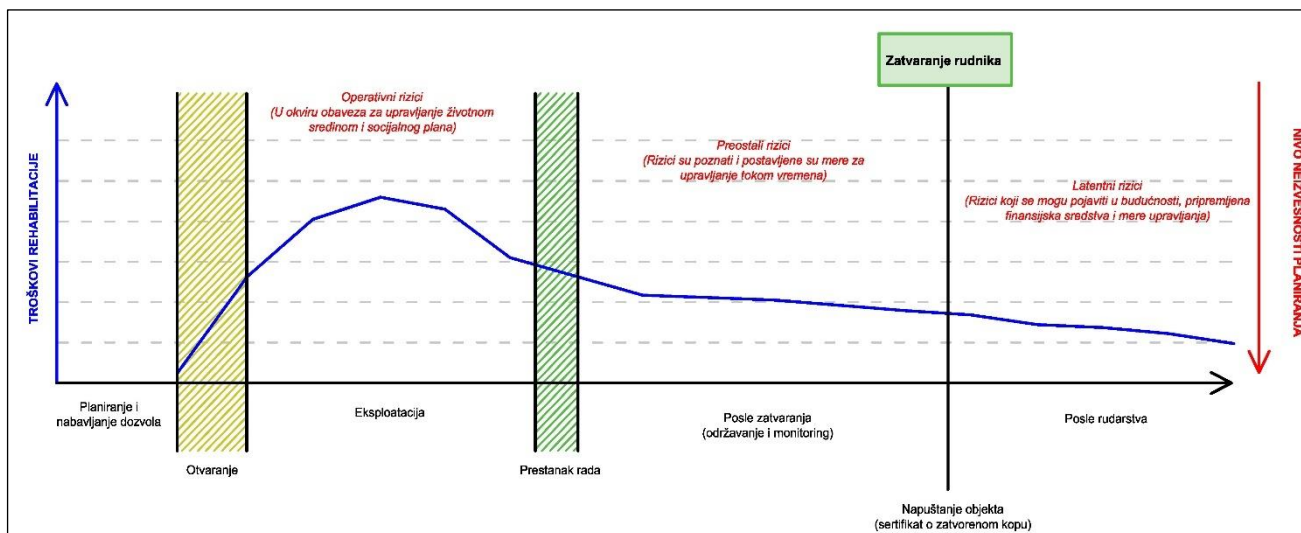
Osim navedenih uticaja, jedna od specifičnosti eksploatacije ležišta urana na bazi granita može biti povećana radioaktivnost tla u zonama oko eksploatacionog polja i jalovišta. Autori Li i drugi dokazali su da prirodni radionuklidi u sedimentima i zemljištu u oblasti Kine gde se eksploatiše uran ima mnogo veće prosečne aktivnosti  $^{226}Ra$ ,  $^{238}U$ ,  $^{232}Th$  i  $^{40}K$  od vrednosti koje se na svetu

smatraju bezbednim. Visoke vrednosti  $R_{ack}$  (ekvivalentna aktivnost radijuma), DR (brzina apsorbovane gama doze), AEDE (godišnji efektivni ekvivalent doze), AGDE (godišnji ekvivalent doze na reproduktivne žlezde) i ELCR (prekomerni životni rizik od raka) nalaze se u istraživanim oblastima otkopavanja urana i jalovišta. Zbog uticaja eksploatacije urana, ovi pokazatelji u oblastima iskopavanja urana su više nego dvostruko veći od svetskog proseka, a najviši može dostići čak i 10 puta veće vrednosti. Povodom toga, radnici ili lokalno stanovništvo koji borave ili rade u ovoj oblasti treba da preduzmu odgovarajuće zaštitne mere [78].

Posebna pažnja se posvećuje odlagalištima otkrivke i naročito jalovine iz pripreme mineralnih sirovina. Otkrivka su mase koje su otkopane da bi se došlo do mineralne sirovine, i uglavnom najveći uticaj spoljašnjih odlagališta otkrivke je zauzet određen prostor i narušeno postojeće zemljište, dok su ekološki rizici odlaganja jalovine iz procesa pripreme mineralnih sirovina nešto složeniji. Važne razlike po kojima se rudarska jalovina razlikuje od ostalog rudarskog otpada su: (i) veličina čestica, pri čemu jalovina rudnika ima finu granulometriju koja se sastoji od peska, mulja i gline; (ii) prisustvo hemijskih reagenasa iz metalurškog procesa; i (iii) transportovanje korišćenjem vode za transport [79]. U zemljama sa najvećom proizvodnjom bakra, Čileu i Peru, istraživanja su pokazala da je kontaminacija jalovinom iz rudnika značajna za zdravlje i životnu sredinu okolnih zajednica zbog nedostatka adekvatnog upravljanja jalovinom i zatvaranja rudnika [79][80][81].

Sa aspekta održive površinske eksploatacije je veoma važan i izbor najpovoljnijeg načina korišćenja zemljišta nakon zatvaranja površinskog kopa sa odlagalištima, jalovištima sa infrastrukturuom uz podizanje njegove vrednosti i zadovoljavanja važećih ekoloških standarda.

Proces rehabilitacije sa rekultivacijom je veoma skup i iznosi oko 10% troškova površinske eksploatacije pri povoljnim pouzdanim uslovima [82]. Realizacija kvalitetnog, efikasnog i integralnog pristupa rehabilitacije i rekultivacije, tokom celog životnog veka površinskog kopa, dugoročno smanjuje rizike i negativne posledice eksploatacije, kao i tekuća i konačna finansijska ulaganja u proces (Slika 2.2.5.3.1.). Kao što je prikazano na slici, pravilno integralno planiranje rehabilitacije tokom životnog veka površinskog kopa smanjuje troškove i povećava pouzdanost realizacije vezane za eksploatacione rizike, preostale poznate rizike nakon eksploatacije i nepredviđene ekološke rizike nakon zatvaranja.



Slika 2.2.5.3.1. Pravilno integralno planiranje rehabilitacije sa rekultivacijom tokom životnog veka površinskog kopa

Imajući u vidu da su potencijalni izvori kontaminacije, jasno je da je odgovorno i savremeno održivo upravljanje odlagalištima i jalovištima ključno za zaštitu tla i zdravlja okolnog stanovništva.

#### *2.2.5.4. Uticaji na životinjski i biljni svet*

Očigledno je da tokom eksploatacije na površinama zauzetim površinskim kopovima, odlagalištima i pratećom rudarskom infrastrukturom, ne može privremeno biti staništa za biljne i životinjske vrste koje su se tu nalazile pre eksploatacije. Sklanjanje humusnog sloja i buka tokom radnog veka površinskog kopa su neizbežni uticajni faktori na floru i faunu, kao i na život nastanjenih životinjskih vrsta u okolnim zonama. Budući da su zauzete površine privremenog karaktera, u dobroj praksi se po potrebi organizuje selidba manje mobilnih životinjskih vrsta radi njihove protekcije. Životinjske vrste koje su izuzetno mobilne, kao što su ptice ili različite vrste predatora, se same sklone iz zone kopa sa pojavom radova i buke.

Najveći problem po životinjske vrste mogu biti po vodozemce i vodene beskičmenjake u slučaju premeštanja reka, stvaranja većih akumulacija vode, ili iscrpljivanja određenih akumulacija prilikom otvaranja površinskog kopa na toj lokaciji [64].

Čak i kada je u pitanju podvodno rudarstvo, koje se smatra budućnošću za otkopavanje velikog broja mineralnih sirovina, istraživanja pokazuju da će eksploatacija morskog ili jezerskog dna stvoriti oblake sedimenata i buku na morskome dnu i u vodenom stubu koji mogu imati velike ekološke efekte u dubokim srednjim vodama [83].

#### *2.2.5.5. Uticaji na ljude*

Uticaji površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina na ljude se može posmatrati sa dva aspekta, sa aspekta potencijalnog raseljavanja stanovništva iz zone eksploatacionog polja i uticajne zone, i sa aspekta socijalnih pitanja.

Imajući u vidu da su mineralne sirovine, odnosno mineralni resursi od javnog interesa najčešće od izuzetnog nacionalnog ili strateškog značaja po državu, u slučaju da se naseljeno mesto ili određena domaćinstva nalaze iznad ležišta, potrebno je iseliti stanovništvo, što samo po sebi često stvara ekološke, socijalne i ekonomske komplikacije za realizaciju projekta eksploatacije.

Jedna od pratećih komponenti rudarstva su takođe migracije radnika i njihovih porodica ka rudniku, posebno pri otvaranju većih površinskih kopova. Radnici kopa se obično nastanjuju u najbližem naseljenom mestu sa porodicama, što stvara prostor za razvoj svih pratećih ugostiteljskih objekata, prodajnih objekata i školskih institucija, i pozitivno utiče na razvoj lokalne zajednice. Rudarstvo je generalno istaknuto kao efikasan način za iskorenjivanje globalnog siromaštva, posebno za udaljena planinska područja [84][85].

Zbog negativne reputacije koja prati rudarstvo, sve više se stavlja akcenat na blisku saradnju sa lokalnim stanovništvom, komunikacijom i rešavanju njihovih problema. Neophodna je kontinuirana, transparentna komunikacija sa lokalnim zajednicama. Pitanja upravljanja rudarskim projektom uključuju upravljanje odnosima sa lokalnim zajednicama, obezbeđivanje poštenih radnih praksi i pridržavanje sve strožih ekoloških propisa.

#### **2.2.6. Socijalni rizici**

Trenutni aktuelni pristup socijalnim rizicima podrazumeva da se oni mogu sagledati kao pretnja za ljude, odnosno radnu snagu i lokalno stanovništvo, kao i kao rizik za rudarski projekat. Procena oba aspekta je ključna za efikasno upravljanje projektom, uz poseban fokus na očuvanje socijalnog mira, što predstavlja zajednički interes društva i kompanije koja se bavi eksploatacijom. Socijalni rizici se mogu – i često je to slučaj – prevesti u značajne poslovne rizike ako se njima pogrešno upravlja [86].

Sa stanovišta posmatranja socijalnih rizika kao uticaja na ljude, po definiciji Evropske banke, socijalni rizici predstavljaju uticaje na (1) standarde rada i uslove zapošljavanja, (2) uticaje na zajednicu kao što su javno zdravlje, bezbednost, sigurnost, rodna ravnopravnost, uticaji na autohtono stanovništvo i kulturno nasleđe, otkup zemljišta ili potencijalno smanjenje sredstava za život ljudi kao rezultat projektnih aktivnosti i (3) zdravlje i bezbednost na radu. Takođe uključuje nesrazmerne uticaje na ugrožene grupe/pol, nedobrovoljno preseljenje i pristupačnost osnovnih usluga [60].

AngloAmerican smatraju da su socijalni rizici koji utiču na poslovanje, zaposlene, izvođače i eksterne zainteresovane strane [87]. Ovakve definicije povezuju (eksterni) socijalni rizik i (interne) poslovne i projektne ciljeve sa putanjom efekata koji teče u oba smera, istovremeno [88]. Naravno, uticaj rudarstva može biti i pozitivan i negativan za društvenu zajednicu, u skladu sa vrstom projekta i načinom poslovanja. Pozitivni efekti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina su ekonomski razvoj, razvoj zajednice i dobre prilike za direktno i indirektno zapošljavanje.

Iako su mnogi uticaji lokalizovani, širi društveni kontekst rudarskih aktivnosti može uticati na percepcije i očekivanja u vezi sa određenim projektom. Postojeći pogledi na rudarstvo, prošla iskustva i percepcije proceduralne pravičnosti oblikuju način na koji zajednica procenjuje novi projekat. Pored toga, upravljanje komunikacijom među ključnim zainteresovanim stranama može značajno uticati na nivo poverenja uspostavljenog ili narušenog između njih.

U kontekstu savremenog rudarstva kojim dominiraju izazovi da se dostigne *net-nula* emisija i da se održava konstantan profit, diskusija oko socijalnih pitanja je do skoro ostavljena po strani. Sektor rudarstva se nalazi na raskrsnici kritičnih društvenih izazova i izazova upravljanja. Pošto se države značajno oslanjaju na mineralne resurse za ekonomski rast, poslovanje industrije je pod intenzivnim ispitivanjem zbog njihovog društvenog uticaja. Društvena pitanja u rudarskom sektoru obuhvataju niz zabrinutosti, od raseljavanja lokalnih zajednica, menjanja tradicionalnog načina života, intenzivnije saobraćajne infrastrukture, do zdravstvenih opasnosti povezanih sa rudarskim operacijama i neadekvatnim pravima radnika, u zavisnosti od efekata primenjivanja zakonske regulative države. Ti problemi su posebno prisutni u regijama gde je veliki broj ilegalnih rudnika u zemljama drugog i naročito trećeg sveta. Istovremeno, širom sveta pitanja upravljanja u sektoru rudarstva šire se na regulatorne neadekvatnosti, zabrinutost zbog odsustva transparentnosti i korupcije, i eksploataciju resursa za kratkoročnu ekonomsku dobit bez razmatranja dugoročne održivosti. Istraživanje inovativnih pristupa za rešavanje društvenih pitanja i pitanja upravljanja u rudarskom sektoru je ključno za odgovornu i održivu eksploataciju mineralnih sirovina. Svi ovi faktori mogu da imaju negativan uticaj na neometanu eksploataciju mineralnih sirovina, i da se ogledaju u otežavanju uslova rada, smanjenju proizvodnje i nedostizanja planiranog profita. U tom smislu se ogledaju problemi, odnosno socijalni rizici po rudarski projekat, kao integralni deo rizika u rudarstvu.

Socijalni rizici koji mogu nepovoljno da utiču na normalan i profitabilan rad rudnika su:

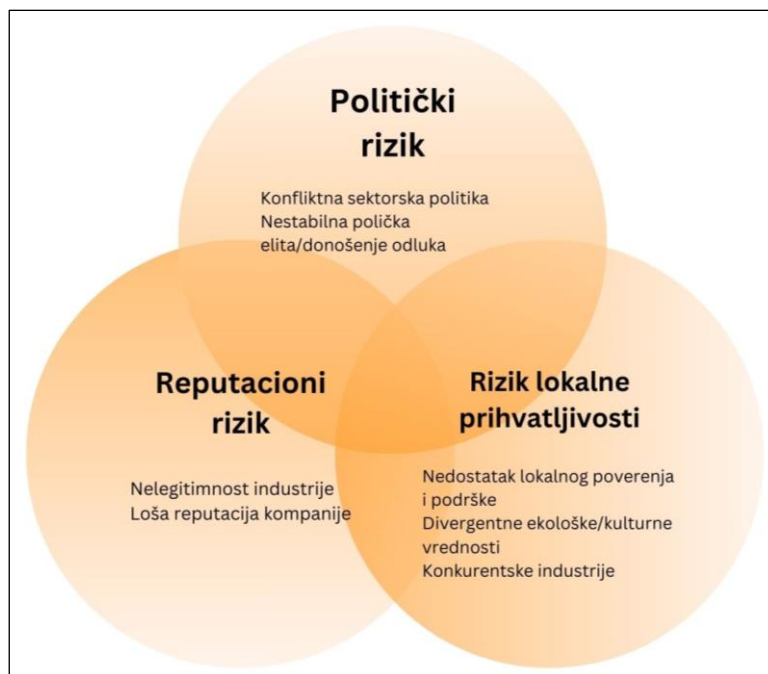
- Nepoverenje prema kompaniji koja vrši (ili planira da vrši) eksploataciju,
- Odsustvo transparentnosti koje dovodi do širenja dezinformacija među neupućenim lokalnim stanovništvom, pa zatim i medijima,
- Moguća prisutna loša reputacija kompanije koja želi da vrši eksploataciju,
- Prisustvo ekoloških nevladinih organizacija koje se protive rudarstvu – takozvani aktivizam klimatskih promena,
- Prinudno zaustavljanje rada usled protesta i demonstracija,
- Nerealni zahtevi stanovništva, pokrenute pravne akcije,
- Politička nestabilnost, visok nivo korupcije,
- Resursni nacionalizam – preferencija državnog posedovanja rudnika usled promene političkih struja i jačanja nacionalizma unutar države.

Različite faze rudarstva imaju različite društvene efekte. Čak i manje intenzivna faza istraživanja može značajno uticati na zajednice. Dugi procesi izdavanja dozvola koji prethode eksploataciji mogu dovesti do produžene neizvesnosti, izazivajući strah, stres i anksioznost među stanovnicima. Nasuprot tome, projekti istraživanja mogu stvoriti nerealna očekivanja o potencijalnim koristima rudnika, koja se kasnije možda neće ispuniti, jer jako mali procenat istraživanja ležišta mineralnih sirovina zapravo vodi do otvaranja rudnika. U pogledu ekonomskih efekata, intenzivno istraživanje može pružiti ograničene regionalne koristi, jer radnici i kompanije koriste lokalne usluge [61]. Autori Mancini i Sala su ispitali 50 studija u relevantnim oblastima vezanim za socijalne uticaje, i zaključili su da se uticaji rudarstva uglavnom odnose na tri oblasti: korišćenje zemljišta i prostorni aspekti, uticaji na životnu sredinu koji ujedno utiču na zdravlje i ljudska prava. Štaviše, pojavili su se uticaji vezani za demografiju, posebno u smislu migracije i rodne neravnoteže u rudarskim

zajednicama. Dok su uticaji na životnu sredinu koji utiču na zdravlje od interesa u svim geografskim regionima koji su procenjeni, korišćenje zemljišta i prostorni aspekti su prisutni uglavnom u afričkim zemljama. Australija ima najveću učestalost pozitivnih uticaja, uglavnom u pogledu prihoda i zaposlenosti (tj. iz ekonomskih razloga) [89]. Iz toga se može zaključiti da napredne zemlje koje imaju uređenu zakonsku regulativu iz oblasti rudarstva, dobru izvršnu vlast po pitanju poštovanja zakonske regulative, odličnu rudarsku praksu i kvalitetan odnos sa zaposlenima, imaju ujedno i najviše pozitivnih socijalnih uticaja od rudarstva.

Proceniti balans između isplativosti rudarskog projekta i potencijalnih negativnih uticaja eksploatacije je ključan, kako za firme, tako i za nadležne organe. Istovremeno, ne sme se zaboraviti da je rudarstvo osnova infrastrukture društva. Sve što ljudi koriste ili konzumiraju se ili uzgaja, eksploatiše ili vadi. Razumljiva želja društva za čistijim svetom prečesto zanemaruje činjenicu da se mineralne sirovine koje sadrže metali i materijali koji se koriste u zelenim tehnologijama kao što su solarni paneli, vetroparkovi i električna vozila moraju da se iskopaju. To važi i za sada nezamenljive tehnologije savremenog života, od pametnih telefona i tableta do medicinskih uređaja [90]. Na ovaj način se stvara sukob između potrebe za mineralnim sirovinama čija je eksploatacija neophodna za opstanak ljudi i održavanja standarda života na koji su svi navikli, i sve veće svesti za očuvanjem planete i preostalih resursa koji su neobnovljivi i ograničeni.

Autori Suopajarvi i drugi su identifikovali tri društvena aspekta poslovnog rizika koji mogu da stvore probleme rudarskoj industriji: politički, reputacioni i lokalna prihvatljivost (Slika 2.2.6.1.). Politički rizik nastaje kada vlasti i zakoni srodni rudarstvu dođu u sukob, kao što je zakonodavstvo i strategije o upravljanju resursima, i nasuprot tome zakonodavstvo o zaštiti životne sredine. Reputacioni rizik leži u odnosu između prošlih i sadašnjih operacija kompanije u kombinaciji sa legitimnošću cele industrije. Rizik lokalne prihvatljivosti paralelan je sa društvenom licencom za rad, sa lošim korporativnim ponašanjem, konkurencijom sa drugim sredstvima za život, upadom u kulturno osetljiva područja i lokalnim vrednostima koje kritički posmatraju eksploataciju mineralnih sirovina [91].



*Slika 2.2.6.1. Tri tipa poslovnih rizika uzrokovanih socijalnim aspektima koji su specifični za rudarstvo [91]*

Rudarstvo prati loša reputacija zbog istorijski neadekvatno vođenih rudarskih projekata [92]. Sve organizacije su obavezne da posluju odgovorno i unutar svoje sfere uticaja, kao što je navedeno u različitim smernicama i konvencijama. ISO 26000 Vodič o društvenoj odgovornosti (ISO 2010) uspostavlja okvir za ovu odgovornost identifikacijom obaveza u sedam ključnih oblasti [93]:

1. Održivo upravljanje procesima
2. Ljudska prava
3. Prava zaposlenih
4. Životna sredina
5. Uključivanje i razvoj zajednice
6. Poštene radne prakse
7. Pitanja potrošača

Svaki od ovih oblasti obuhvata niz obaveza i pristupa koji omogućavaju bezbedan, neometan i efikasan rad organizacija, što je posebno bitno u kontekstu površinske eksploatacije, čiji uticaji na životnu sredinu, zaposlene i lanac potrošača mogu biti značajni. Uticaji na životnu sredinu takođe imaju značajne društvene implikacije. Rudarske aktivnosti mogu dovesti do promena u pogodnostima u zajednici, zdravlju ili dostupnosti i kvalitetu vode i zemljišta. Uticaji mogu biti direktni, kao što je uticaj buke i prašine, ili mogu biti indirektni, kao što su putevi povećanog saobraćaja u obližnjem gradu koji opslužuje rudnik. Uticaji se često akumuliraju i međusobno deluju tako da pokreću ili postaju povezani sa drugim uticajima [94], o čemu je i bilo reči u prethodnim potpoglavljima.

U tabeli 2.2.6.1. prikazani su primeri dobrog postupanja u odnosu prema zajednici kada su u pitanju zabrinutosti društva vezane za eksploataciju. Ovi postupci pomažu bilo kojoj rudarskoj kompaniji da stvori dobre odnose sa lokalnom i širom zajednicom, čija je podrška izuzetno poželjna radi dobijanja neophodnih dozvola za otvaranje rudnika i za održivu i bezbednu eksploataciju sa dugoročnim uspehom, u vremenu kada se lični, politički i pogotovo geopolitički interesi često mešaju u pristupu rudarstvu kao osnovnoj industriji neophodnoj za život. Uključivanje zajednice može dovesti do boljih rezultata projekta, lokalne podrške i smanjenja rizika kao što su protivljenje ili kašnjenja. Pored toga, podrška lokalnom razvoju kroz izgradnju infrastrukture, otvaranje radnih mesta i brigu o životnoj sredini oslikava korporativnu odgovornost, a istovremeno promovise dobru volju i međusobno poverenje.

**Tabela 2.2.6.1. Primeri dobrog postupanja prema zajednici [86]**

Zabrinutost	Rešenje za zajednicu
Zabrinutost zajednice o uticaju rudarstva i prerade na kvalitet vode, vazduha i tla.	Učiniti podatke monitoringa dostupnim na lako pristupnoj i razumljivoj formi. Koristiti nezavisne stručnjake koji su prihvatljivi za zajednicu da pregledaju podatke. Uključiti grupe iz zajednice u monitoring (npr. uzimanje uzoraka). Preuzeti aktivnu ulogu u lokalnim i regionalnim inicijativama za rešavanje pitanja kvaliteta vode, vazduha i tla.
Zabrinutost o uticaju rudarstva i prerade na životnu sredinu i pejzažne vrednosti.	Raditi sa grupama u zajednici na identifikaciji projekata za poboljšanje/zaštitu vrednih pejzaža i ekosistema tokom i nakon eksploatacije.
Rudarstvo i prerada se smatraju uzrokom smanjenja dostupnosti vode za druge svrhe koje zajednica vrednuje.	Potražiti mogućnosti za poboljšanje dostupnosti i snabdevanja vodom u zajednici. Uključiti grupe u zajednici u istraživanje alternativa za zadovoljavanje potreba za vodom (npr. kompenzacije).

Angažovanje sa zainteresovanim stranama u zajednici i građenje odnosa kroz razumevanje i dobru volju su ključni. Kao i otvorenost i direktnost u vezi sa potencijalnim rizicima. Uspostavljanje smislenih i pravovremenih puteva za dvosmerni dijalog i razumevanje istorije, odnosa i mreža zainteresovanih strana preko tih dijaloga, kao i vrednosti koje oblikuju stavove i ponašanja građana.

Procena i upravljanje socijalnim rizicima je od izuzetne važnosti za društvenu zajednicu, regionalni mir, projekat rudarstva i njegovu održivost, pogotovo uzimajući u obzir da se eksploatacija obično obavlja određen niz godina, i da za to vreme mora da postoji saradnja između zajednice i rudarske kompanije koja vrši eksploataciju. Kroz procenu i upravljanje socijalnim rizicima, dizajn i implementacija rudarskih aktivnosti mogu se oblikovati tako da poboljšaju ishode na životnu sredinu i zajednicu.

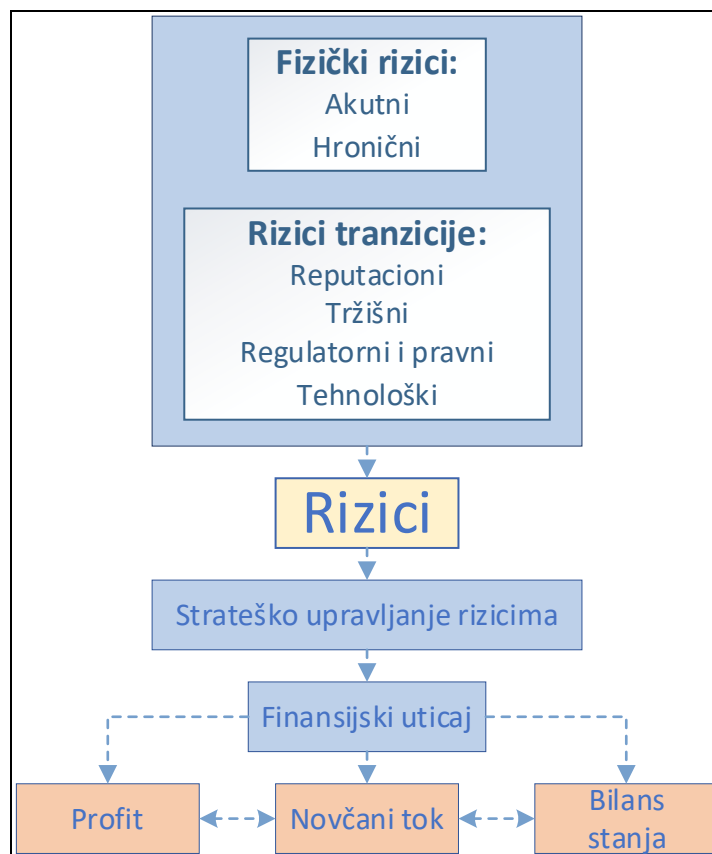
### **2.2.7. Rizici klimatskih promena**

Pošto su rudarski radovi geografski široko rasprostranjeni, rudarska industrija je pod komplikovanim prostorno-promenljivim uticajem klimatskih promena, koje uključuju promene temperature i padavina, kao i češće i teže ekstremne vremenske prilike. Klimatski uslovi utiču na dostupnost transportnih puteva, očuvanje životne sredine i procedure zatvaranja lokacije, kao i stabilnost i efikasnost opreme i infrastrukture. Na cenu i stabilnost izvora energije i vode takođe mogu uticati klimatske promene [95].

Imajući u vidu da su klimatske promene neizbežne na svim delovima planete, one takođe imaju posebno znatan uticaj na površinsku eksploataciju. Obično se klimatskim promenama, naročito sve više učestalim padavinama i rizicima od poplava i erozija, pridaje vrlo malo pažnje prilikom upravljanja rudarskim projektom, odnosno uzimanja rizika u obzir prilikom projektovanja površinskog kopa i pratećih objekata. U cilju donošenja odluka o investiranju, potrebno je poboljšano otkrivanje materijalnih rizika, mogućnosti, finansijskih uticaja i procesa upravljanja u vezi sa klimatskim promenama.

Radna grupa za finansijske odluke vezane za klimu i Kanadski administratori za sigurnost (kapitalnog tržišta) podelili su fizičke rizike klimatskih promena na akutne i hronične. Fizički rizici koji proističu iz klimatskih promena mogu biti vođeni trenutnim događajima (akutni) ili dugoročnim promenama (hronični) u klimatskim obrascima. Akutni fizički rizici se odnose na one koji su vođeni događajima, uključujući povećanu ozbiljnost ekstremnih vremenskih događaja, kao što su cikloni, uragani, poplave ili erozije. Hronični fizički rizici odnose se na dugoročne promene u klimatskim obrascima (npr. trajne više temperature) koje mogu izazvati porast nivoa mora ili hronične toplotne talase [96][97].

Kao što je objašnjeno u ovim izveštajima, postoji još niz drugih rizika koje klimatske promene vuku sa sobom sem fizičkih rizika klimatskih promena: reputacioni, tržišni, regulatorni i pravni, politički i najzad tehnološki. Ovi rizici mogu imati kratkoročni ili dugoročni uticaj po kompaniju. Slika 2.2.7.1. prikazuje na koji način rizici klimatskih promena utiču na finansijski rezultat.



Slika 2.2.7.1. Prikaz uticaja rizika klimatskih promena na finansije [96]

Rizici tranzicije u kontekstu klimatskih promena predstavljaju rizike vezane za nabavku novih čistih tehnologija, prilagođavanje sve oštrijim zakonskim ograničenjima emisija, opasnosti po reputaciju kompanije i promene na tržištu. To su rizici nastali zbog pritiska na rudarske kompanije da smanje emisije štetnih gasova, zbog svetskog obavezivanja na dekarbonizaciju.

Ekstremni klimatski događaji kao što su ekstremne padavine koje povlače poplave, klizišta i eroziju, uragani, zemljotresi itd., koji predstavljaju akutne fizičke rizike, su sve učestaliji i zbog toga se moraju uvrstiti u procenu rizika sa povećanom verovatnoćom događaja nego što je to bio slučaj do sad. Autori Iqbal i drugi prikazali su na primeru hidrogeološkog modela basena reke Kabul u Pakistanu, na osnovu povećanja temperature, padavina i nivoa reke, da se u zavisnosti od scenarija i modela opšte cirkulacije, sadašnji događaji koji se smatraju verovatnim jednom u 50 godina, se mogu u budućnosti dešavati od jednom u svake 3 godine do jednom u svake 24 godine [98]. Što znači minimum dva puta češće nego po svim pretpostavkama na svetu, uključujući Republiku Srbiju. Japanski eksperti su utvrdili da povratni period katastrofalnih pojava poplava i nevremena ( $T_r = 1/p$ ) od 50 godina mora da se svedena današnji povratni period od 20 godina [99]. Hidrološki proračuni u oblasti rudarstva baziraju se na starijoj propisanoj vrednosti povratnog perioda pre klimatskih promena od 100 godina, ali je realno taj povratni period svesti na 50 godina, imajući u vidu sve češće promene klime [100].

BSR su analizirali izveštaje velikog broja rudarskih kompanija 2009. godine o rizicima i prilikama klimatskih promena u Projektu o ugljeniku, i identifikovali sledeće rizike [95]:

1. Remećenje infrastrukture i rada rudnika
2. Promena pristupa lancima snabdevanja i putevima distribucije
3. Izazovi za zdravstvene i bezbednosne uslove radnika
4. Izazovi upravljanja životnom sredinom i ublažavanjem posledica
5. Više tačaka pritiska sa odnosima u zajednici
6. Istraživanje i budući rast

1. Podrazumeva pojave ekstremnih klimatskih događaja koji mogu da oštete površinski kop, prateće infrastrukturne rudarske objekte, opremu, transportne puteve i da utiču na stabilnost kosina površinskog kopa. Izuzetno visoke temperature i suša mogu da povećaju verovatnoću pojave požara, koji bi ugrozili rad objekata. Takođe bi se pri velikim vrućinama pojavio problem manjka dostupnih vodenih resursa za korišćenje, i veća potrošnja električne energije za hlađenje. U suprotnom slučaju, pri pojavi ekstremnih padavina i pratećih poplava, došlo bi do zaustavljanja proizvodnje i problemima sa odvodnjavanjem površinskog kopa i pročišćavanjem voda.

2. Nepovoljni klimatski uslovi otežavaju ili sprečavaju transport dobara i materijala, što remeti lanac snabdevanja i stvara probleme nestašice ili korišćenje alternativnih puteva transporta koji znatno više koštaju.

3. Pri težim uslovima za rad, veća je verovatnoća da će radnici da greše pri radu, što dovodi njihovu bezbednost u opasnost. Povišene temperature uzrokuju niz pratećih zdravstvenih problema, kao i veću prisutnost tropskih bolesti. Poplave mogu ugroziti bezbednost radnika na lokaciji i na putevima.

4. Ekstremni klimatski događaji imaju veliki uticaj na životnu sredinu, znatno otežavajući zaštitu životne sredine u vidu potencijalnog smanjenja stabilnosti odlagališta i jalovišta, stabilnosti kosina površinskih kopova, i remećenjem procesa rehabilitacije, kao i radova na remedijaciji zemljišta, odnosno biološkom rekultivacijom.

5. Loši klimatski uslovi stvaraju nemire u društvenim zajednicama, gde se mogu pojaviti novi zahtevi za podršku od strane rudarske kompanije koja radi na lokalitetu. Periodi suše, poplave i ekstremni događaji vode do problema sa vodom, bolestima, povećanjem siromaštva, migracijama i generalno potencijalom za društvenim nemirima. Ovo ujedno direktno utiče i na živote zaposlenih, prisustvo i produktivnost.

6. Oblasti u kojima je potrebno istraživanje mogu biti zaštićene ili je eksploatacija na tim lokalitetima uslovljena strogim regulativnim granicama za emisije, zbog čega postoji mogućnost da otvaranje rudnika nije isplativo. Nedovoljan pristup ovih lokaliteta izvorima energije takođe može biti otežavajući faktor za razvoj budućih projekata. Veliki rizik od klimatskih nepogoda na određenim mestima obeshrabruje investitore.

Na osnovu svega navedenog, jasno je da klimatske promene mogu imati znatan uticaj na površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina, i da je zbog toga izuzetno značajno da se uzmu u obzir prilikom procene rizika projekta rudarstva radi sigurnijih investicija, pouzdanijeg projektovanja rudarskih objekata, kao i formiranja strategije saradnje za odnose sa lokalnim stanovništvom, drugim industrijama i javnošću u cilju adaptacije regiona na klimu.

### **2.2.8. Rizici zastoja i prekida proizvodnje**

Očigledno je da zastoji iz bilo kog razloga na površinskom kopu dovode do kraćeg ili dužeg remećenja funkcionisanja celog sistema eksploatacije i predstavljaju najznačajniji pokretač rasta rizika upravljanja proizvodnim procesima. Kod manjih i srednjih kopova, to znači gotovo siguran prekid proizvodnje mineralne sirovine, a na velikim površinskim kopovima sa više nezavisnih kontinualnih sistema u najboljem slučaju smanjenje proizvodnje, u zavisnosti od uzroka zastoja. To su otkazi opreme i loše održavanje, ali i neplanirane i nepredvidive vrste zastoja usled poplava, zemljotresa ili nestabilnosti usled nedisciplinovanog rada koji stvaraju veće tehničke probleme na površinskom kopu za koje je potrebno određeno vreme da se reše, kod kosina, transportnih puteva ili opreme. Međutim, u modernom rudarstvu se takođe javljaju novi politički i društveni faktori, čiji rezultat mogu da budu demonstracije ili protesti u zoni rada površinskog kopa, što dovodi do prinudnog zastoja rada ukoliko obezbeđenje ne postoji. Tim vrstama rizika nije jednostavno upravljati, i iz tog razloga može doći do privremenog prestanka proizvodnje.

Sem troškova koji neminovno idu na popravku i ponovno pokretanje sistema, bitan je i gubitak profita usled odsustva proizvodnje. Da bi se postigli planirani projektovani ciljevi, u najkraćem roku i sa što manjim troškovima u investicionim projektima, ključno je da se rudarski radovi i proizvodnja odvijaju bez prekida. Profit u slučaju rudarstva podrazumeva vrednost zarade od prodaje proizvoda koji se dobija rudarskim aktivnostima. Zbog toga zastoji, koji stvaraju bilo kakvo povećanje u

operativnim troškovima, ili zaustavljaju proizvodnju gde ujedno ne postoje zalihe, umanjuju profit. Gubitak profita može da predstavlja dvostranu štetu, kao izuzetno nepovoljna situacija i šteta za kompaniju koja vrši eksploataciju i javlja se kao poseban kao problem državama u razvoju, s obzirom na to da se države u razvoju u velikoj meri oslanjaju na rudarstvo za ekonomski razvoj.

Jasno je na koji način su ovi rizici usko povezani sa ostalim vrstama rizika koji su prethodno pomenuti u ovom poglavlju, i zbog čega je izuzetno bitno da se ne dozvole bilo kakvi događaji koji bi doveli do prekida proizvodnje.

### **2.2.9. Rizici zatvaranja rudnika**

Rudarstvo je suočeno sa sve većim pritiscima da primeni održiva rešenja za zatvaranje površinskih kopova, usklađena sa zakonskom i procesnom regulativom, lokalnom zajednicom i drugim zainteresovanim stranama, koje zahtevaju dugoročnu odgovornost prema životnoj sredini. Rudnici i lokalno stanovništvo je često u međuzavisnom odnosu. Za vreme eksploatacije površinski kopovi donose korist stanovništvu kroz mogućnost zapošljavanja sa dopunskim obrazovanjem, praksom i boljom zdravstvenom zaštitom. Ali, iako je rudnik važna komponenta ekonomije, zatvaranje rudnika može imati negativan uticaj na lokalnu pa i regionalnu ekonomiju.

Rehabilitacija i zatvaranje rudnika je više zakonski regulisano sada nego ikada u prošlosti, sa znatno većim nivoom odgovornosti i zahtevima stanovništva i ekoloških grupa. Ugroženost reputacije menadžmenta rudnika, koji ne zadovoljavaju ova očekivanja, je značajno uvećana. Sa druge strane, integralna rehabilitacija, koja posebno obuhvata završnu rekultivaciju, demontažu opreme i uklanjanje infrastrukture zatvorenih površinskih kopova, je veoma složena i veoma retko može da ostvari sve zahteve održivosti.

Integrisano zatvaranje rudnika je dinamički i iterativni proces koji obuhvata ekološke, socijalne i ekonomske faktore održivosti od istraživanja, otvaranja, razvoja pune eksploatacije do kraja veka objekta. Integralno obuhvatanje zatvaranja je jedan od najvažnijih elemenata za celokupni proces površinske eksploatacije. Ranije je planiranje zatvaranja rudnika bilo uglavnom usmereno na tehničke prostorne aspekte preko tehničke i biološke rekultivacije. Međutim, sve veća zainteresovanost stanovništva za efekte zatvaranja i perspektive razvoja, dovodi do nezadovoljstva sa takvim pristupom i ne ispunjavanja njihova očekivanja. Ti socijalni i ekonomski rizici i oportunitizam procesa zatvaranja rudnika su veliki, i upravo ukazuju na potrebu proaktivnog održivog planiranja i blagovremenu pripremu tokom celog eksploatacionog veka površinskog kopa sa jasnim procenama funkcionalnosti prostora zatvorenih površinskih kopova.

Svaki rudarski projekat je zakonom uslovljen da mora da sadrži plan zatvaranja. U Republici Srbiji, svaka studija izvodljivosti eksploatacije mora prema *Pravilniku o sadržini studije izvodljivosti eksploatacije ležišta mineralnih sirovina* (Službeni glasnik RS, broj 108 od 1. decembra 2006.) da sadrži prikaz predviđene tehničke i biološke rekultivacije u okviru rudarsko-geološkog dela studije, kao i prikazano stanje zatvaranja rudnika i investiciona ulaganja u fazi zatvaranja rudnika.

U zavisnosti od planova rudarskog projekta i mogućnosti, površina zauzeta zatvorenim površinskim kopom se rekultivacijom može dovesti u stanje slično stanju pre eksploatacije, naravno uz nestanak određenih masa koje su otkopane radi dostizanja mineralne sirovine. Osim toga, zatvoreni površinski kopovi mogu da budu predviđeni za neku novu namenu, npr. za poljoprivredu, za turizam, za rekreaciju itd. Kvalitetnom i dobrom rudarskom praksom i rekultivacijom se površina zauzeta površinskim kopom i pratećim objektima može dovesti u stanje gde je neprepoznatljivo da je tu nekada bio aktivan površinski kop. Sređivanje predela posle rudarstva je složen izazov zbog nepostojanja univerzalnog plana rekultivacije, jer svi radovi moraju biti prilagođeni jedinstvenim karakteristikama svake lokacije, odnosno ležišta. Postizanje uspešne i održive rekultivacije zahteva interdisciplinarni pristup, kombinujući stručnost za razvoj integrisanih i delotvornih planova koji obnavljaju ekološke, hidrološke, estetske, rekreativne i druge funkcije pejzaža [101]. Planiranje zatvaranja rudnika zahteva rešavanje niza međusobno povezanih tehničkih, pravnih, finansijskih i društveno-ekonomskih izazova. Najbolja praksa je po mogućstvu uporedni rad na rekultivaciji, dok traje sama eksploatacija, što bi olakšalo finansijski teret ulaganja u zatvaranje i takođe omogućilo iskorišćenje već postojeće pomoćne rudarske opreme za radove.

Ukoliko je proces zatvaranja rudnika, odnosno površinskog kopa, nepostojeći ili nedovoljno kvalitetan, može da se pojavi niz rizika koji prate nestručno zatvaranje rudnika:

- rizici po životnu sredinu - oticanje kiselih voda, erozija tla, kontaminacija voda,
- neobnavljanje flore i faune,
- rizici po društvenu zajednicu ukoliko postoje faktori koji ugrožavaju životnu sredinu,
- bez pravovremenog planiranja zatvaranja kopa, bez aktivnosti pripreme za zatvaranje tokom same eksploatacije i bez izdvajanja sredstava za to može dovesti do većih troškova, odnosno investicija nakon kraja životnog veka rudnika kada više ne postoji profit od mineralne sirovine,
- negativan uticaj na reputaciju kompanije ukoliko se ostavi neugledna pustoš u zoni eksploatacije, bez rekultivacije ili/i nove namene itd.

Iz navedenog, jasno je zašto treba uspostaviti odgovarajuće planove upravljanja rizikom, radi procenjivanja i kontrolisanja rizika od otkazivanja komponenti plana za integrisano zatvaranje rudnika i rekultivacije, kao i rizici za postizanje ciljeva nakon zatvaranja i rekultivacije [102]. Ove planove upravljanja rizicima treba kontinuirano preispitivati i korigovati tokom operativne faze rudnika, tako da odražavaju trenutno znanje i očekivanja zainteresovanih strana. Planovi zatvaranja se menjaju sa napredovanjem kopa, koristeći informacije koje preduzeća dobiju za rešavanje operativnih problema primenom tehnika adaptivnog upravljanja. Mere kao što je rehabilitacija su standardni odgovor kada se jave neželjeni efekti koji se ne mogu sprečiti. Otežavajući faktor je to što mora da se predvidi budući izgled rudnika i sve moguće varijante tih planova da bi postupak zatvaranja ispravno završio. Koristeći podatke o životnoj sredini koje je kompanija do tada prikupila, moraju da se identifikuju potencijalni problemi uzimajući u obzir koliko dobro rudnik u trenutku rada rešava slične probleme, koji su problemi nastali u obližnjim rudnicima i koji su problemi u trendu u objavljenoj literaturi o zatvorenim rudnicima. Pre nego što se mogu kreirati, proceniti i ugraditi mere za upravljanje i ublažavanje uslova specifičnih za lokaciju, moraju se kreirati dalji programi rada za istraživanje i testiranje teorija i procenu rizika. Jedan od ključnih mana je to što u praksi često od hitnog problema do ponuđenog rešenja za ublažavanje, mogu proći godine istraživanja [103].

Planovi zatvaranja rudnika uključuju brojne komponente koje su podložne klimatskim promenama i koje su predviđene da rade tokom veoma dugih vremenskih perioda. Na primer, češći ekstremni klimatski događaji i više padavina mogu ugroziti stabilnost nasipa jalovišta i povećati verovatnoću otkaza nasipa. Snežni pokrivači i njihovo topljenje mogu da preplave sisteme upravljanja vodom i preusmeravanja vode. U severnim regionima, gde nasipi zavise od smrznutih jezgara za zadržavanje vode ili od permafrosta da bi se obezbedila stabilnost nagiba i temelja, promene temperature mogu imati značajne efekte. Varijacije u oticanju, isparavanju, perkolaciji i padavinama će uticati na ravnotežu vode i energije, narušiti performanse sistema membrane, odnosno pokrivača jalovišta i možda će zahtevati češće održavanje i popravke [104].

Autori Cui i drugi su dokazali da se ekološki turizam pokazao kao najbolji način ponovne upotrebe za rudnik uglja Muchengjian. Pošto su ekološki i socijalni aspekti zatvaranja rudnika bili najveći rizici, ovaj način ponovnog korišćenja ne samo da poboljšava zaštitu životne sredine i zdravstveno i bezbednosno stanje, već može i da poveća lokalni prihod i reši problem nezaposlenosti u odnosu na druge načine ponovnog korišćenja zatvorenog rudnika [105]. Imajući u vidu da je u pitanju podzemni rudnik, ekološki i socijalni aspekti su za površinsku eksploataciju još značajniji, zbog veće zauzete površine, vizuelnog aspekta i emisija u vazduh. Autori Cacciuttolo i Atencio su detaljno prikazali višestruke pozitivne strane odlaganja jalovine iz pripreme mineralnih sirovina u završnu konturu površinskog kopa kao deo održivog zatvaranja rudnika, pogotovo imajući u vidu da jalovina ima potencijal da bude ponovo korišćena u svrhu izvlačenja korisne komponente usled sve manje dostupnosti ležišta mineralnih sirovina i napretka tehnologija izvlačenja korisne komponente [106].

Po svemu navedenom, vidi se da je od izuzetne važnosti po društvo, životnu sredinu i kompaniju da se plan zatvaranja integriše sa svim drugim fazama razvoja površinskog kopa, počevši od istraživanja i izrade studije izvodljivosti. Takođe, veoma važna neizostavna komponenta je

monitoring nakon zatvaranja površinskog kopa, radi kontrole potencijalnih emisija i praćenja stanja, da bi se intervenisalo ukoliko dođe do nepredvidivih nepovoljnih promena na terenu.

### **2.2.10. Zakonski rizici**

Budući da je rudarstvo industrijska grana u kojoj postoje značajni rizici, nedoumice kod poseda i poreza, istovremeno svuda na svetu postoje rudarski zakoni i podzakonska akta koja bliže definišu pravila i regulišu eksploataciju ležišta mineralnih sirovina na nivou države.

Uloga zakona i podzakonskih akata u rudarstvu je dvostrana, služi kao zaštita interesa države, lokalnog stanovništva i restrikcijama za radnu i životnu sredinu, ali istovremeno treba da da jasne smernice potencijalnom izvršiocu eksploatacije o proceduri za dobijanje dozvole za eksploataciju, odnosno dobijanje eksploatacionog prava. Zakonska regulativa koja se odnosi na rudarstvo mora biti jasna i koncizno napisana, nedvosmislena i bez nepotrebnih preklapanja unutar nižih podzakonskih akata. Takođe treba da podstiče domaće i strane investitore na ulaganje u rudarstvo. Često je stranim investitorima komplikovana zakonska regulativa otežavajući faktor za uspešno ulaganje.

Autori O'Callaghan i Vivoda analizirali su probleme zakonske regulative u Aziji, i došli su do zaključka da su regulatorno preklapanje, regulatorno zauzimanje i nedostatak nezavisnosti od vlade, nedostatak nepristrasnosti pri donošenju odluka, nedostatak transparentnosti pri donošenju odluka, neadekvatno angažovanje zainteresovanih strana i pristup regulatoru, i nedostatak institucionalnih kapaciteta (resursi regulatora i efikasnost i usklađenost sprovođenja zakona) glavni nedostaci u rudarskoj zakonskoj regulativi zemalja Azije [107]. Slična situacija je i u ostatku sveta.

Sem načina na koji su zakoni napisani, veliki faktor rizika je takođe pristup državnih organa prema kompanijama koje vrše ili žele da vrše eksploataciju, državno sprovođenje zakona i kazni propisanih istim, način na koji donose odluke, obrazloženja, nivo kontrole, i potencijalne izmene zakona dok su određene zainteresovane strane u procedurama po u nekom trenutku nevažećem zakonu, što stvara dodatne nepotrebne komplikacije.

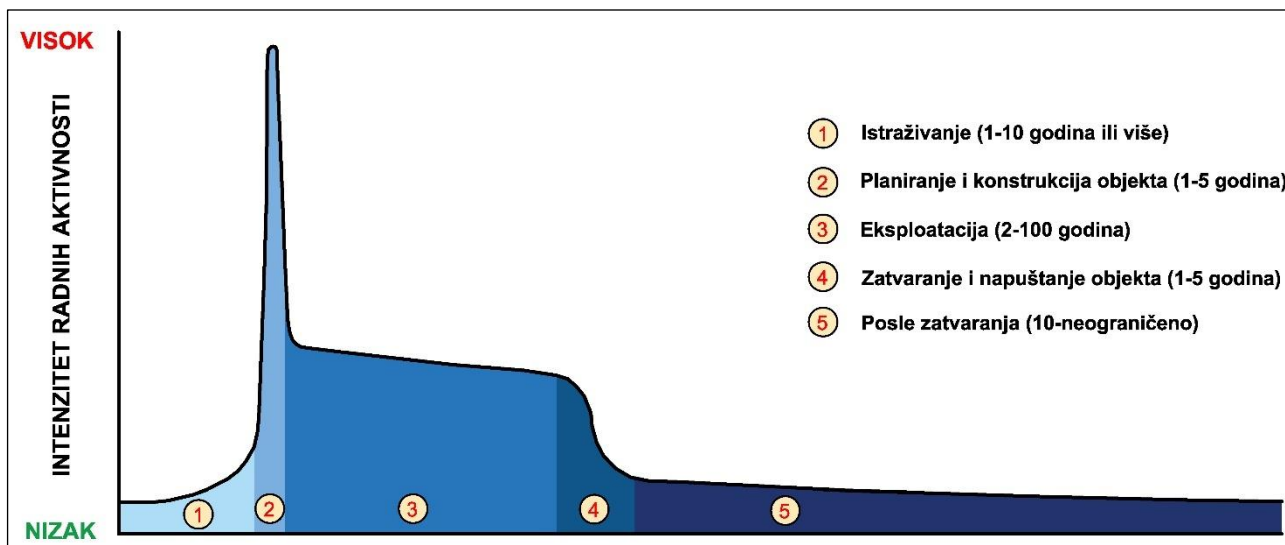
Od suštinskog interesa je svake države, i drugih zainteresovanih strana, da se svi zakonski rizici umanje, da se poveća jasnoća rudarskih zakonskih akata i da se omogući maksimalna transparentnost u ophođenju prema zakonu i kontroli, radi efikasnijih investicija u rudnike i bezbednog održivog rudarstva. U strateškoj dokumentaciji Ujedinjenih nacija i Evropske unije se ukazuje da je za realizaciju savremenog održivog rudarstva neophodno podsticati i pojednostaviti procedure izdavanja dozvola za istraživanje, eksploataciju i preradu mineralnih sirovina.

### **2.2.11. Finansijski rizici**

Ono što izdvaja rudarsku industriju od svih drugih su izuzetno visoke dugoročne i teške investicije, još veći profit i generalno nezamenjivost mineralnih sirovina i njihova neophodnost za život. Ti faktori stvaraju idealne uslove za finansijske rizike, koji su definisani nivoom tačnosti procene investicija i profita, kao i kretanjem cena na tržištu, odnosno potražnjom, i samom geopolitičkom situacijom koja u velikoj meri utiče na trgovinu resursima i lanac snabdevanja.

Ekonomska i finansijska neizvesnost je najviše vezana za dugotrajni životni vek projekta površinske eksploatacije koji počinje aktivnostima na višegodišnjim istraživanjima, koje prati projektovanje, otvaranje površinskog kopa i period eksploatacije koji može da traje od 2 do 100 godina, u zavisnosti od vrste i veličine ležišta mineralnih sirovina. Proces zatvaranja i napuštanja objekata može biti kraći od 5 godina, ali zato kasnije upravljanje projektom nakon zatvaranja kopa može biti u rasponu od jedne decenije do kraja planiranog korišćenja rehabilitovanog prostora u zavisnosti od odluka vlasnika i drugih zainteresovanih strana, što u praksi često predstavlja ozbiljan problem za dugoročno ispunjenje kriterijuma održivosti i ekonomske opravdanosti. Na Slici 2.211.1 je prikazana dinamika razvoja projekta površinske eksploatacije u životno ciklusu sa promenljivim nivoom aktivnosti i potrebne radne snage, gde je data zavisnost potrebne radne snage i promenljivog nivoa aktivnosti u odnosu na vreme faza razvoja. Ova promenljivost značajno utiče na diskontovane tokove novca (engl. *discounted cash flow* - DCF), neto sadašnju vrednost (engl. *net present value* -

NPV) i internu stopu povraćaja (engl. *internal rate of return* - IRR) investicionih i tekućih ulaganja, što uslođnjava finansijsku efikasnost planirane površinske eksploatacije.



Slika 2.2.11.1. Trajanje aktivnosti u životnom ciklusu projekta površinske eksploatacije [108]

Pored već navedenih, rizici uključuju varijacije stope proizvodnje, cene robe, fluktuacije deviznog kursa, kapitalne izdatke i promene u ponudi i potražnji [109]. Sve to utiče na finansijski aspekt eksploatacije mineralnih sirovina, odnosno na investicije i profit investitora. COVID-19 je bio surov primer nestabilnosti potražnje zbog ekonomske neizvesnosti i uvođenja niza procedura i protokola izazvanih restrikcijama [110]. Kao što je opštepoznato, kod rudarskih projekata su bitni i ekonomski rizici kao što su stopa prinosa, neto sadašnja vrednost i period otplate [111].

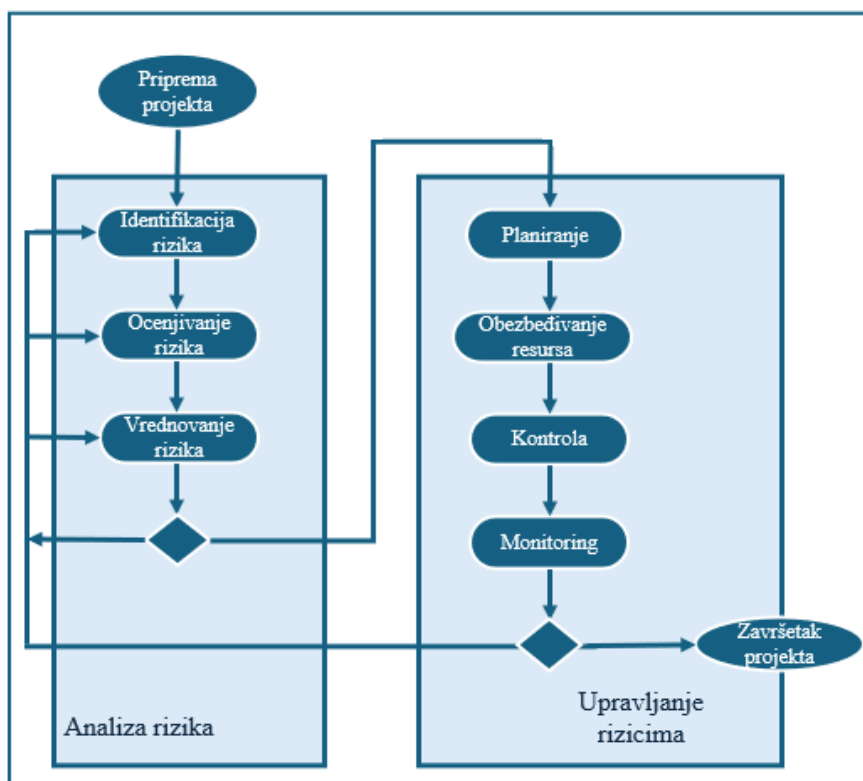
Svi prethodno navedeni rizici su promenljivi u vremenu i prate ih određeni novčani gubici kao posledicu otkaza ekosistema površinske eksploatacije i tako čine finansijske rizike jako osetljivim, bilo da su interne nezgode i otkazi ili eksterni problemi na koje ne može da se utiče. Obuhvaćeni su u preliminarnim i konačnim parcijalnim i ukupnim analizama finansijskih rizika.

### 3. UPRAVLJANJE RIZICIMA NA POVRŠINSKIM KOPOVIMA

Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina spada u složene industrijske procese, gde se uglavnom podrazumeva otkopavanje otkrivke i mineralne sirovine velikih masa, upotreba teških mašina i ponekad opasni radne uslove. Efikasno upravljanje rizikom je od suštinskog značaja za površinske kopove, kako bi se sprečile nesreće, obezbedila sigurnost radnika, zaštitila životna i radna sredina i održala produktivnost. Glavni cilj upravljanja rizicima je sistematsko identifikovanje, procena i ublažavanje opasnosti koje mogu ugroziti ljude, imovinu, radnu ili životnu sredinu. Proaktivan pristup upravljanju rizicima ne samo da poboljšava operativne performanse, već i osigurava usklađenost sa najboljim industrijskim praksama i zakonskim regulativama.

Imajući u vidu da se radi o veoma dinamičnom i promenljivom okruženju, savremene korporativne organizacije, posebno u rudarskoj industriji, suočavaju se sa sve većim pritiscima da unaprede svoju konkurentnost, dok istovremeno moraju da podržavaju principe održivog razvoja i štite interese svih zainteresovanih strana. Ponašanje rizika u organizaciji je najčešće promenljivo tokom vremena. To znači da se sve procesne aktivnosti odvijaju u uslovima veće ili manje nestabilnosti sistema. Pored toga, rudarske kompanije se suočavaju sa značajnim rizicima u svim svojim domenima, bez obzira da li su rizici prirodnog, komercijalnog ili tehničko-tehnološkog porekla. Da bi se efikasno upravljalo rizicima, neophodno je da se identifikuju rizici koji prate rudarstvo u svim svojim aktivnostima i da se razume kako ti rizici utiču na ostvarivanje korporativnih ciljeva organizacije koja je u pitanju. Ovakav pristup poslovanju opravdava sve veće prihvatanje upravljanja rizikom kao standarda u rudarskom sektoru. Kao što je napomenuto ranije, svest o rizicima značajno je povećana u rudarskoj industriji poslednjih godina, a kultura upravljanja projektima i rizicima postala je ključna komponenta u svim aspektima rudarskih operacija.

Procenjeni rizik zabeležen u datom trenutku ne mora ostati na istom nivou u sledećem, što znači da prihvatljivi rizik može iznenadno postati neprihvatljiv usled određenih okolnosti koje se javljaju tokom vremena. Ovo dovodi do potrebe za stalnim sprovođenjem kontrole rizika, kao i kontinuiranim aktivnostima za održavanje rizika na prihvatljivom nivou tolerancije. U skladu sa prirodom problema, stalna kontrola i održavanje rizika na prihvatljivom nivou za organizaciju predstavljaju poslovni proces [112]. Na Slici 3.1. prikazan je model procesa upravljanja rizicima.



Slika 3.1. Prikaz modela upravljanja rizicima

Međunarodni standard ISO 14000 (engl. *Environmental Management System*), koji je fokusiran na upravljanje sistemom životne sredine, detaljno objašnjava procedure i specifičnosti upravljanja projektima zaštite životne sredine, bez obzira na industriju, organizaciju ili aktivnost, što obuhvata i površinsku eksploataciju. Dok upravljanje rizikom zavisi od standarda iz porodice ISO 31000, koncepti upravljanja sistemom životne sredine temelje se na ovom standardu. Korišćenjem okvira iz porodice standarda ISO 14000, kompanije mogu razvijati projekte koji su ekološki odgovorni i usmereni ka održivosti, što je od izuzetne važnosti za rudarske kompanije, kao za i samu eksploataciju mineralnih sirovina.

Sušтина upravljanja rizikom sastoji se iz identifikacije, procene i postavljanja prioriteta rizika, uz preduzimanje mera da se rizici smanje, prate i upravlja verovatnoćom ili uticajem nepovoljnih događaja.

Procena rizika predstavlja sistematski proces koji obuhvata identifikaciju, analizu i evaluaciju potencijalnih rizika vezanih za određenu aktivnost, proces ili sistem. Glavni cilj procene rizika je razumevanje neizvesnosti i mogućih neželjenih događaja koji bi mogli uticati na ciljeve, operacije ili rezultate. Imajući u vidu da je površinski kop dinamično radno okruženje koje se neprekidno menja i razvija, razumevanje, predviđanje i ublažavanje rizika postali su osnova efikasnog donošenja odluka u rudarstvu, kao i u svim drugim industrijama i sektorima. S obzirom na složenost faktora koji utiču na bilo koju vrstu poslovanja, proaktivan i sistematski pristup proceni rizika postaje ne samo strateška neophodnost već i osnovni faktor održivosti i uspeha.

U svrhu identifikacije, procene i smanjenja mogućih opasnosti povezanih sa rudarskim aktivnostima, upravljanje rizicima predstavlja ključni proces. Prema definiciji ISO 31000 standarda, upravljanje rizicima se sastoji iz sledećih osnovnih elemenata [1]:

- komunikacija i konsultacije,
- uspostavljanje konteksta,
- procena rizika (identifikacija rizika, analiza rizika, evaluacija rizika),
- tretman rizika,
- monitoring i kontrola.

S obzirom na to da se rudarske operacije najčešće odvijaju u složenim i opasnim uslovima, skoro uvek je prisutan visok nivo rizika. Rudarska preduzeća mogu zaštititi svoje radnike, očuvati životnu sredinu i obezbediti kontinuitet poslovanja kroz sistematsku procenu rizika. Identifikacija opasnosti predstavlja prvu fazu procene rizika, u kojoj se prepoznaju potencijalne pretnje kao što su geološka nestabilnost, kvarovi opreme, izloženost gasovima i brojne ljudske greške. Razumevanje obima i vrsta rizika koji mogu uticati na produktivnost i bezbednost zahteva ozbiljnu i detaljnu identifikaciju rizika. Proaktivno planiranje i uporedno prilagođavanje postaje moguće zahvaljujući ranom otkrivanju ovih rizika.

Nakon identifikacije opasnosti, rizici se detaljno analiziraju kako bi se utvrdile njihove verovatnoće i posledice. U ovoj fazi često se koriste alati kao što su matrice rizika, analize istorijskih podataka i prediktivno modeliranje. Prioritizacija rizika prema njihovom mogućem uticaju omogućava da se budući naponi fokusiraju na najhitnije probleme. Na primer, brzi i temeljni koraci za ublažavanje bili bi neophodni u slučaju događaja sa visokom verovatnoćom i ozbiljnim posledicama, poput otkaza nasipa na jalovištu ili klizišta na površinskom kopu. Pored unapređenja bezbednosti radnika, efikasna procena rizika u rudarstvu takođe štiti životnu sredinu i povećava operativnu efikasnost, što su ključni stubovi za postizanje održive i bezbedne eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Rudarske kompanije mogu smanjiti broj nesreća, smanjiti vreme zastoja i osigurati usklađenost sa propisima kroz sistematsko upravljanje rizicima. Proaktivan pristup upravljanju rizicima doprinosi uspehu i održivosti svih rudarskih projekata.

Redovno praćenje monitoringom i kontinuirano usavršavanje po potrebi su takođe ključni za efikasno upravljanje rizicima na površinskim kopovima. To podrazumeva redovne bezbednosne revizije, istrage incidenata i primenu tehnologija kao što su sistemi za praćenje u realnom vremenu, dronovi za posmatranje i nadgledanje i prediktivna analitika.

Pravilno upravljanje trenutnom, već nastalom krizom obično podrazumeva tri faze. Ako se kriza ne može nikako izbeći, treba isplanirati taktiku, odnosno strategiju za upravljanje krizom.

Kreiranje planskih dokumenata i rešavanje krize, ukoliko do nje dođe, bilo bi na drugom mestu, a donošenje postkriznog zaključka da se nastavi sa poboljšanjem upravljanja i budućih aktivnosti bila bi treća faza. Potrebno je vreme i pažljivo planiranje da se uspostavi ovakav pristup.

Razvijanje metodičkog okvira ili modela za upravljanje rizicima u svim fazama životnog ciklusa rudnika - od istraživanja i razvoja do eksploatacije, pripreme i integralnog zatvaranja - predstavlja jedan od ključnih aspekata upravljanja rizikom. Rizici se obično klasifikuju prema svojoj verovatnoći i posledicama, nakon čega se primenjuju odgovarajuće mere kontrole i monitoringa. Upravljanje rizicima na površinskim kopovima predstavlja posebno izazovan poduhvat, zbog svestranih mogućnosti za otkaze ili nepovoljne događaje u okviru natprosečno dinamične radne sredine sa velikim brojem potprocesa, od kojih u velikoj meri zavisi funkcionisanje celog sistema.

Najbolje i najdetaljnije razvijen okvir za smernice pri upravljanju rizicima je ISO standard 31000:2018, čija je poslednja unapređena verzija objavljena 2018. godine. Rudarske organizacije, svih vrsta i veličina, posebno u domenu površinske eksploatacije u kontinuitetu se suočavaju sa unutrašnjim i spoljašnjim uticajima koji ih čine nesigurnima. Ta nesigurnost ima kao posledicu rizik za ciljeve organizacije. Zbog toga, rudarske organizacije moraju da uspostave proces upravljanja rizicima kako bi mogle da u kontinuitetu nadziru, kritički ocenjuju i sprovode aktivnosti na eliminaciji ili smanjenju rizika na prihvatljiv nivo. Takav sistemski i logički standard detaljno opisuje standard ISO 31000:2018 kao poslednja verzija [113]. U Tabeli 3.1. dat je prikaz okvira međunarodnih standarda za upravljanje ekološkim rizicima ISO 31000:2018 sa navedenim odabranim pratećim priručnicima.

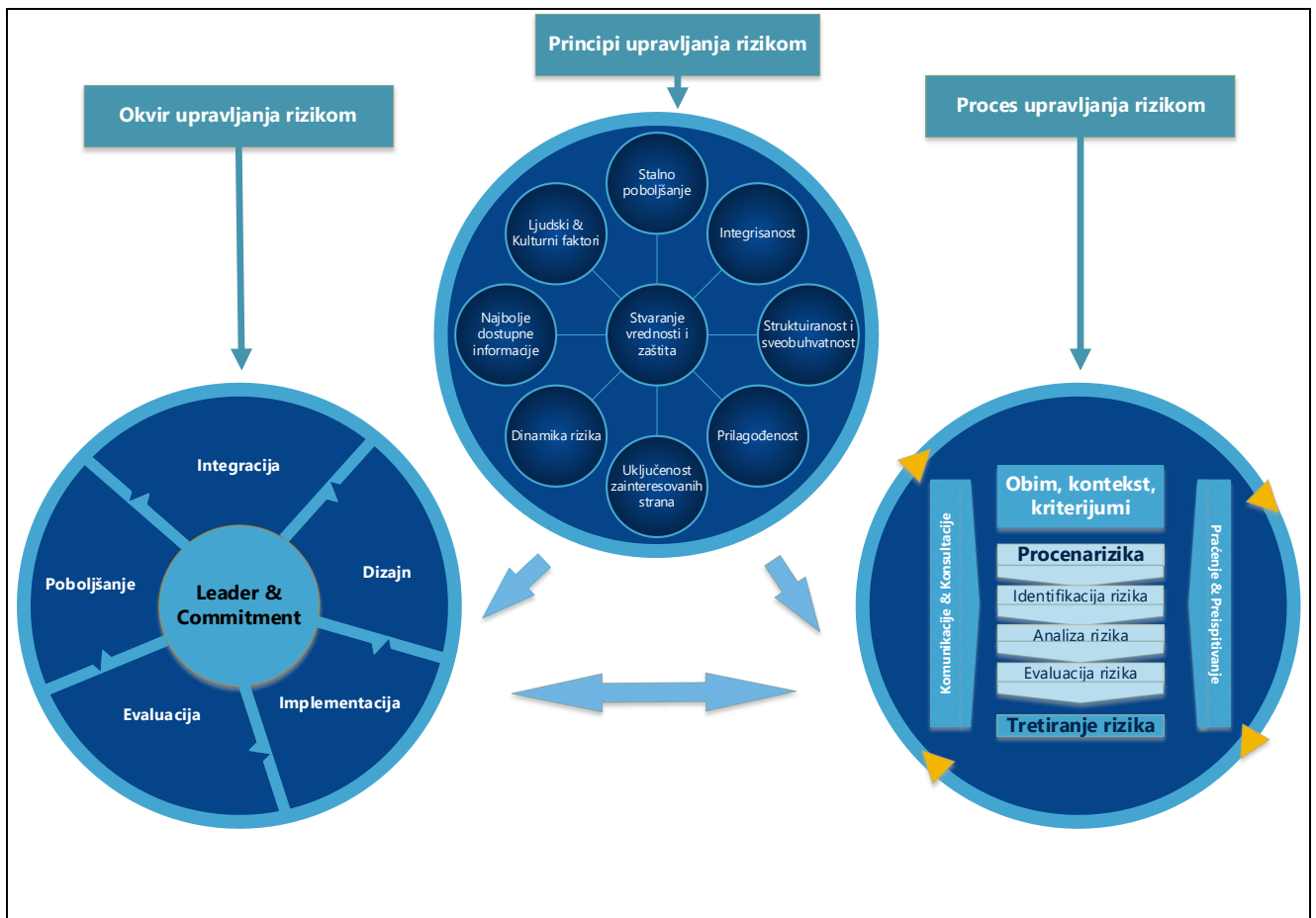
**Tabela 3.1. Odabrani relevantni međunarodni standardi za upravljanje rizicima [113]**

Naziv	Svrha/opis	Delokrug
<b>ISO 31000:2018 - Risk Management</b>  <i>ISO 31000:2018 - Upravljanje rizicima</i>	ISO 31000:2018 pruža principe i opšte smernice o upravljanju rizicima. Odnosi se na bilo koju vrstu rizika, bez obzira na njegovu prirodu. Primena je dobrovoljna.	Odnosi se na sva javna, privatna ili društvena preduzeća, asocijacije, grupe ili pojedince.
<b>ISO/IEC 31010:2009 - Risk Management - Risk Assessment Techniques</b>  <i>ISO/IEC 31010:2009 - Upravljanje rizicima - Tehnike procene rizika</i>	ISO 31010 pomaže organizacijama u implementaciji načela upravljanja rizicima i smernica koje je objavio ISO 31000 i bavi se konceptima i procesima procene rizika i izborom metoda procene rizika. Ovaj standard ne obuhvata sve metode, a izostavljanje metode iz ovog standarda ne znači da metoda nije važeća. Standard nije namenjen za sertifikaciju, regulatorne ili ugovorne primene.	Odnosi se na sva javna, privatna ili društvena preduzeća, asocijacije, grupe ili pojedince. Procena rizika koristi razumevanje rizika dobijenog tokom analize za donošenje odluka o budućim akcijama. Procena rizika se može primeniti u svim fazama životnog ciklusa projekata.
<b>IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)</b>  <i>IEC 60812:2018 Metode FMEA i FMECA</i>	Svrha sprovođenja FMEA i FMECA metoda podržava odluke koje smanjuju verovatnoću neuspeha/otkaza i njihove posledice, direktno ili korišćenjem dopunskih analiza. Rezultati obuhvataju povećanu pouzdanost, ali i smanjenje uticaja na životnu sredinu i operativnih troškova. FMEA se može prilagoditi potrebama bilo koje industrije ili organizacije.	Procena rizika FMEA ili FMECA metodama se može koristiti za analize opravdanosti svih vrsta projekata kao i za procese sertifikacije. Primarni korisnici ove metode su oni koji vode projekte, ali i sve druge zainteresovane strane u realizaciji.

<p><b>IEC 60300-3-1:2003</b>  <b>Dependability management - Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability - Guide on methodology</b></p> <p><i>IEC 60300-3-1:2003</i>  <i>Metodološki priručnik za analizu metoda pouzdanosti</i></p>	<p>U ovom delu standarda dat je opšti pregled najčešće korišćenih metoda analize pouzdanosti. Opisuje uobičajene metodologije, njihove prednosti i nedostatke i druge uslove za korišćenje različitih metoda. Predstavlja uvod u odabrane metodologije i ima za cilj da pruži neophodne informacije za izbor najprihvatljivijih metoda analize.</p>	<p>Ove metode se primenjuju u logistici i planiranju održavanja i obnavljanja nakon otkaza uz procenu njihove učestalosti. Ove procene često definišu osnovne elemente troškova u toku životnog ciklusa projekta.</p>
<p><b>IEC 60300-3-11:2009</b>  <b>Dependability management - Part 3 - 11: Application guide - Reliability centred maintenance</b></p> <p><i>IEC 60300-3-11:2009</i>  <i>Priručnik za održavanje usredsređeno na pouzdanost</i></p>	<p>Održavanje usredsređeno na pouzdanost (RCM) je metoda za identifikaciju i izbor politika upravljanja otkazima kako bi se efikasno i efektivno postigla potrebna sigurnost i ekonomičnost rada. Utvrđuje proces odlučivanja za postizanje primenljivog i uspešnog upravljanja preventivnim održavanjem ili obnavljanjem opreme, u skladu sa mogućim bezbednosnim, operativnim i ekonomskim posledicama identifikovanih otkaza.</p>	<p>RCM je dokazana i prihvaćena metodologija koja se koristi u svim industrijama. Prihvatanje analizom usvojene politike upravljanja otkazima, koja uključuje poboljšane aktivnosti održavanja, operativne promene i modifikacije dizajna, obezbeđuje ublažavanje posledica otkaza.</p>
<p><b>CEI/IEC 61165:2006</b>  <b>Application of Markov techniques</b></p> <p><i>CEI/IEC 61165:2006</i>  <i>Primena Markovljevih metoda</i></p>	<p>Ovaj međunarodni standard pruža smernice za primenu Markovljevih tehnika za modeliranje i analizu sistema i procenu pouzdanosti, obnovljivosti i mogućih preventivnih i korektivnih mera. Homogene metode obuhvaćene ovim standardom pretpostavljaju konstantne intenzitete prelaza iz stanja u stanje koje su nezavisne od vremena.</p>	<p>Ovaj standard je primenljiv na sve industrije u kojima je funkcionisanje standarda zavisno od definisanih analiziranih stanja.</p>
<p><b>ISO/IEC 31073:2022 - Risk management - Vocabulary</b></p> <p><i>ISO 31073:2022 Rečnik za upravljanje rizicima</i></p>	<p>Ovaj priručnik pruža definicije opštih pojmova vezanih za upravljanje rizicima. Kada se termini standarda koji se odnose na upravljanje rizikom koriste, važno je da njihova značenja ne budu pogrešno protumačena, pogrešno predstavljena ili zloupotrebljena.</p>	<p>Dokument koji podstiče međusobno i dosledno razumevanje i pristup opisu aktivnosti u vezi sa upravljanjem rizicima, kao i korišćenje jedinstvene terminologije upravljanja rizikom u poslovnim procesima.</p>

U okviru ISO standarda 31000:2018, postoji i ISO/IEC 31010 standard, koji podržava ISO 31000 i pruža smernice za izbor i primenu tehnika za procenu rizika u različitim situacijama, kodifikovan od strane Međunarodne organizacije za standardizaciju (engl. *International Organization for Standardization - ISO*) i Međunarodne elektrotehničke komisije (engl. *International Electrotechnical Commission - IEC*). Kompletan naziv standarda je ISO/IEC 31010:2019 – Upravljanje rizikom – Tehnike procene rizika. Postoji i veliki broj standarda za pojedine metode.

Osnovu modela ISO 31000:2018 čine precizno definisani *Principi upravljanja rizikom*, *Okvir za upravljanje rizikom* i *Proces upravljanja rizikom*. Model standarda ISO 31000:2018 prikazan je na Slici 3.2. [113].



Slika 3.2. Model (principi, okvir, proces) upravljanja rizicima po standardu ISO 31000:2018 [113]

Razumevanje i upravljanje rizicima su ključni aspekti donošenja odluka i planiranja. Rizik se često procenjuje kombinacijom kvantitativne i kvalitativne analize, sa ciljem donošenja informisanih izbora i mera koje balansiraju potencijalne koristi i nedostatke. Efikasno upravljanje rizikom uključuje identifikaciju, procenu i ublažavanje potencijalnih pretnji uz istovremeno prepoznavanje prilika koje mogu proizaći iz neizvesnosti prilikom aktivnog praćenja stanja.

### 3.1. Procena rizika na površinskim kopovima

Procena rizika predstavlja celokupni proces identifikacije rizika, analize rizika i evaluacije rizika [114], koji se može primeniti na bilo kom nivou operacija ili ciljeva. Procena rizika u kontekstu površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina podrazumeva identifikaciju, analizu i evaluaciju rizika u složenom sistemu površinske eksploatacije, gde je prisutno puno uticajnih faktora na sam proces dobijanja mineralne sirovine, u svim fazama razvoja površinskog kopa. To uključuje ekonomske, tehničko-tehnološke, ekološke ili društvene uticajne faktore. Izuzetno je važno obaviti detaljnu procenu rizika radi pravilnog upravljanja rizicima, posebno imajući u vidu da rudarstvo ima veliki svetski značaj, široku rasprostranjenost, kao i potencijalno velike posledice nepovoljnih događaja i otkaza. Kao rezultat svega toga, rudarski sektor se u poslednjih par decenija fokusira na razvijanje različitih koncepata procene rizika i načinima upravljanja rizicima, od kojih bi industrija, društvo i životna sredina imali velike koristi u smislu zaštite, razvoja i sticanja dobre reputacije. Primarni cilj procene rizika na površinskim kopovima je procena opasnosti i nedostataka pri izvršenju rudarskih radova, radi maksimalnog povećanja bezbednosnih uslova u toku rada na površinskom kopu, zaštite životne sredine u zoni površinskog kopa i opšte društvene prihvatljivosti pri dostizanju planiranih kapaciteta.

Proces procene rizika se sastoji iz sledećih koraka [114]:

- identifikacija rizika;
- analiza rizika - analiza posledica;

- analiza rizika - kvalitativna, polu-kvantitativna ili kvantitativna procena verovatnoće;
- analiza rizika - procena efektivnosti svih postojećih kontrola;
- analiza rizika - procena nivoa rizika;
- evaluacija rizika.

Pridavanje važnosti na primeni ideje upravljanja rizikom u rudarskim operacijama svedoči činjenica da je upravljanje rizicima postalo sastavni deo zakona i pravilnika relevantnih za rudarstvo, a istovremeno prisutno u obliku različitih standarda. Autori Tubis A. i drugi identifikovali su 19 direktiva i standarda koji se posebno odnose na rudarsku industriju u ovoj oblasti. Takođe, primećuje se povećan broj objavljenih naučnih publikacija o proceni i upravljanju rizicima [115].

Postoji 31 metoda za procenu rizika navedenih u Aneksu A i B standarda ISO/IEC 31010 (Tabela 3.1.1.) [114].

**Tabela 3.1.1. Primenljivost alata koji se koriste za procenu rizika [114]**

Alati i metode	Proces procene rizika				
	Identifikacija rizika	Analiza rizika			Evaluacija rizika
		Posledice	Verovatnoća	Nivo rizika	
<i>Brainstorming</i>	VP1)	NP2)	NP	NP	NP
Strukturirani ili polustrukturirani intervjui	VP	NP	NP	NP	NP
<i>Delphi</i>	VP	NP	NP	NP	NP
Kontrolne liste	VP	NP	NP	NP	NP
Analiza primarne opasnosti	VP	NP	NP	NP	NP
Studije opasnosti i operabilnosti ( <i>Hazard and operability studies - HAZOP</i> )	VP	VP	p3)	P	P
Analiza opasnosti i kritične kontrolne tačke ( <i>Hazard Analysis and Critical Control Points - HACCP</i> )	VP	VP	NP	NP	VP
Procena rizika po životnu sredinu (toksičnosti)	VP	VP	VP	VP	VP
Struktura « Šta ako? » ( <i>SWIFT</i> )	VP	VP	VP	VP	VP
Analiza scenarija	VP	VP	P	P	P
Analiza uticaja na poslovanje	P	VP	P	P	P
Analiza uzroka	NP	VP	VP	VP	VP
Analiza režima i efekata otkaza ( <i>Failure Mode and Effects Analysis - FMEA i Failure Mode, Effect &amp; (Criticality) Analysis - FMECA</i> )	VP	VP	VP	VP	VP
Analiza stabla grešaka	P	NP	VP	P	P
Analiza stabla događaja	P	VP	P	P	NP
Analiza uzroka i posledica	P	VP	VP	P	P
Uzročno-posledična analiza	VP	VP	NP	NP	NP
Analiza slojeva zaštite ( <i>Layer protection analysis - LOPA</i> )	P	VP	P	P	NP
Stablo odlučivanja	NP	VP	VP	P	P
Analiza ljudske pouzdanosti	VP	VP	VP	VP	P
Analiza leptir mašna	NP	P	VP	VP	P
Održavanje usredsređeno na pouzdanost ( <i>Reliability Centred Maintenance - RCM</i> )	VP	VP	VP	VP	VP

<b>Analiza prikrivenog kola</b>	P	NP	NP	NP	<b>NP</b>
<b>Markovljeva analiza</b>	P	VP	NP	NP	<b>NP</b>
<b>Monte Karlo simulacija</b>	NP	NP	NP	NP	<b>VP</b>
<b>Bajesova statistika i Bajesove mreže</b>	NP	VP	NP	NP	<b>VP</b>
<b>FN krive</b>	P	VP	VP	P	<b>VP</b>
<b>Indeksi rizika</b>	P	VP	VP	P	<b>VP</b>
<b>Matrica posledica/verovatnoća</b>	VP	VP	VP	VP	<b>P</b>
<b>Analiza troškova i koristi</b>	P	VP	P	P	<b>P</b>
<b>Analiza višekriterijumskog odlučivanja (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA)</b>	P	VP	P	VP	<b>P</b>
1) <b>Veoma primenljivo.</b> 2) <b>Nije primenljivo.</b> 3) <b>Primenljivo.</b>					

Kao što je prikazano u Tabeli 3.1.1., postoji niz različitih alata i metoda za procenu rizika, koje su prilagođene specifičnom kontekstu i potrebama u određenoj situaciji, s tim što određene metode nisu za primenu u svakom koraku u okviru procesa procene rizika, a neke su u većoj ili manjoj meri primenljive u određenim koracima procesa procene rizika. Samo mali broj metoda od pobrojanih u standardu, su preporučene za primenu kroz ceo proces procene rizika. Jedna od najbolje ocenjenih je multidisciplinarna polu-kvantitativna FME(C)A (engl. *Failure Mode, Effect & (Criticality) Analysis*) metoda. Sa ovom metodom su u potpunosti kompatibilne, i efikasne za procene ekoloških rizika, dobro ocenjene metode RCM (engl. *Reliability Centred Maintenance*) i Markovljeva analiza. Procena rizika po životnu sredinu, koja se posebno koristi za Procenu rizika toksičnosti (engl. *Toxicity assessment - Environmental risk assessment*), odnosi se na negativni uticaj procesa na biljke, životinje i ljude kao rezultat izloženosti nizu opasnosti po životnu sredinu, pa je u tom smislu nedovoljna za kompletno sagledavanje kompleksnog sistema površinske eksploatacije ležišta mineralnih sirovina.

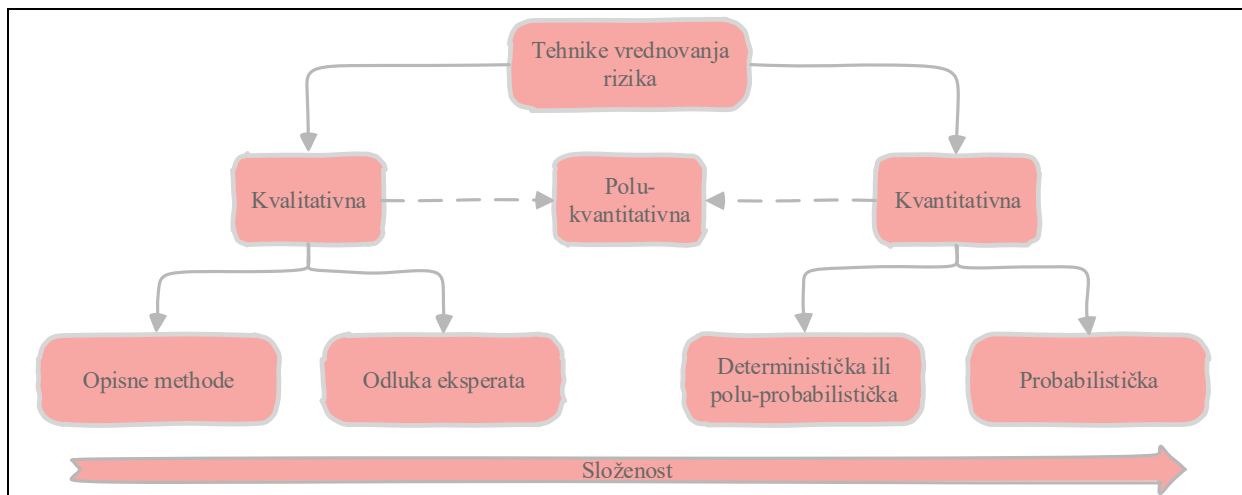
Ove metode su se dosta razvijale tokom vremena i nastavljaju da se unapređuju, a mnoge se mogu koristiti u širokom rasponu situacija izvan njihove izvorne primene. Metode se mogu modifikovati, prilagoditi, kombinovati i primeniti na nove načine ili proširiti kako bi se zadovoljile sadašnje i buduće potrebe. Standard predstavlja osnovu za korišćenje prikazane tehnike i daje pregled moguće primene, prednosti i ograničenja.

Tri kompatibilne metode za procenu verovatnoća pojave ekoloških rizika su opisane u standardima kao priručnici: IEC 60812:2018, IEC 60300-3-1:2003, IEC 60300-3-11:2009, CEI/IEC 61165:2006 i ISO/IEC 31073:2022 - *Vocabulary* koji kao rečnik daje definicije opštih pojmova u vezi sa upravljanjem rizicima prema standardu ISO 31000.

Neke od najpoznatijih i široko rasprostranjenih metoda za analizu rizika su [116][117]:

- Kvalitativna analiza rizika,
- Kvantitativna analiza rizika,
- Polu-kvantitativne analize rizika,
- Opšte analize rizika,
- Procena rizika specifična za lokaciju,
- Dinamička analiza rizika itd.

Iako postoje i drugi pristupi, najpopularnije i najčešće primenjivane metode za analizu rizika su kvantitativna i kvalitativna analiza (Slika 3.1.1.). Pored identifikacije rizika i kreiranja registra rizika, pristup odabran na početku procesa donošenja odluka bi generalno trebalo da bude u stanju da pruži kvantitativno objašnjenje o uticaju rizika i bezbednosnih pitanja [118]. U okviru procesa upravljanja rizicima, analiza rizika se najčešće realizuje primenom kvantitativnih i kvalitativnih metodologija, ili njihovih varijanti [119][120].



Slika 3.1.1. Podela tehnika/metoda za vrednovanje rizika [113]

U sledećim potpoglavljima su detaljnije objašnjene kvalitativne i kvantitativne analize rizika, budući da ova doktorska disertacija predstavlja primer metode koja je kombinacija obe.

### 3.1.1. Kvalitativna analiza rizika

Najčešći oblik procene rizika koji preduzeća primenjuju u visokorizičnim industrijama kao što je rudarstvo je kvalitativna analiza rizika. Kvantitativna analiza rizika se fokusira na utvrđivanje ozbiljnosti rizika. Te analize se oslanjaju na mišljenja i percepcije pojedinca, najčešće člana uprave ili stručnjaka u relevantnoj oblasti, što ih čini subjektivnim i zavisnim od iskustva ocenjivača. Ta subjektivnost je ujedno i nedostatak ove metode procene. Prilikom korišćenja ovih evaluacija, kvalitativni podaci se prikupljaju putem zapažanja ocenjivača, intervjua i ličnih iskustava. Podaci se zatim obrađuju kako bi se utvrdila ozbiljnost specifičnih pretnji. Nakon što su rizici identifikovani, oni se ocenjuju prema verovatnoći i uticaju. Verovatnoća se odnosi na šansu da se rizik ostvari, dok uticaj označava ozbiljnost posledica u slučaju da se pretnja ostvari. Ove procene obično klasifikuju rizike koristeći skalu: niski, srednji i visoki nivo rizika, kao na primeru u Tabeli 3.1.1. Benefiti ove vrste procene rizika su brzina, efikasnost, praktičnost, povoljnost i mogućnost komparativne analize različitih rizika [116][117].

U rudarskom sektoru, opasnosti i poslovni rizici, uključujući mnoge koji se klasifikuju kao katastrofalni rizici, često se ispituju korišćenjem tehnika kvalitativne analize rizika [121]. Iako su kvalitativni pristupi široko primenjivani, imaju određene nedostatke. Pošto se pristup u velikoj meri oslanja na ekspertsko mišljenje, izuzetno je subjektivan, i rizik od potcenjivanja ili precenjivanja je veliki. Kod eksperata, identifikovane su tendencije precenjivanja izuzetno malih rizika i potcenjivanja izuzetno velikih rizika [122][123]. Takođe, predviđanje i upoređivanje scenarija otežano je zbog neizvesnosti, kao i prirodne ili statističke varijabilnosti ponekad ograničenih informacija koje su dostupne, posebno kada se radi o katastrofalnim incidentima otkaza koje javnost često povezuje sa rudarstvom. Ovaj problem dodatno se komplikuje neznanjem, predrasudama i pogrešnim pretpostavkama ljudi, naročito u vremenima značajnih fluktuacija u zaposlenosti i nedostatka talenata [124].

Dijagrami sa tri regiona predstavljaju osnovu konvencionalne kvalitativne metode za analizu rizika. Niski rizici se kreću između 1 i 4, srednji rizici između 5 i 12, dok visoki rizici variraju od 15 do 25 (Tabela 3.1.1.1.). Obrasci rizika, koji pružaju relativno brz i jednostavan način za određivanje optimalnog izbora u odlučivanju prema više kriterijuma, često se koriste za validaciju izbora opcija u rudarskoj industriji. Na osnovu odabranih kriterijuma u ovom primeru, generišu se obrasci koji prikazuju odnos između verovatnoće nastanka rizika i njegovih posledica. Iako zahteva manje truda, kvalitativna metoda je subjektivnija i manje precizna. Umesto da se meri, verovatnoća neuspeha se ocenjuje u pet klasa, koje se kreću od manje od 10% do više od 75%. Takođe, posledice neuspeha su kategorizovane u pet grupa, na primer, od manje od 5 miliona eura do preko 100 miliona eura (Tabela

3.1.1.1.). Istorija određenih pojava (priroda, učestalost i efekti) čini deo procene rizika. Rizik se prikazuje kao proizvod numerički procenjenih vrednosti, uzimajući u obzir kombinovani uticaj obe komponente rizika [124].

Plan mera za kontrolu i smanjenje rizika služi kao početna tačka za procenu troškova posledica. Treba često vršiti procenu troškova posledica, da bi se uzele u obzir modifikacije u uslovima eksploatacije i eventualne fluktuacije cena i valuta na tržištu.

**Tabela 3.1.1.1. Tradicionalna matrica za procenu rizika [124]**

Verovatnoća Posledica		1	2	3	4	5	Nisko Srednje Visoko
		< 10%	10% - 35%	35% - 55%	55% - 75%	> 75%	
1	< 5 M €	1	2	3	4	5	
2	5 - 15 M €	2	4	6	8	10	
3	15 - 50 M €	3	6	9	12	15	
4	50 - 100 M €	4	8	12	16	20	
5	> 100 M €	5	10	15	20	25	

Najrasprostranjeniji kvalitativni pristup proceni rizika, poznat i kao polu-kvantitativna analiza rizika, temelji se na interakciji između verovatnoće da će se rizik ostvariti i potencijalnih posledica po poslovne aktivnosti, procese ili organizaciju u celini. Svaki rezultat rizika se određuje množenjem bodova koji predstavljaju verovatnoću neuspeha i njegove posledice. Kada jedan događaj otkaza izazove neispravnost sistema površinskog kopa, primenjuje se konvencionalna metoda zasnovana na matrici rizika [125]. Nedostatak ove metode se primećuje u situacijama kada je sistem u otkazu zbog više različitih uticajnih faktora. Otkaz obično nastaje usled niza različitih okolnosti, a ukupni rizik je komplikovano opisati na ovaj način. Stoga, da bi se utvrdili kriterijumi tolerancije rizika, potrebno je izračunati ukupan rizik za međusobno isključive pojedinačne pojave ekoloških rizika i opasnosti koje su s njima povezane [124].

Druga najpopularnija metoda procene rizika je kvantitativna procena rizika, u kojoj se rizik meri dodeljivanjem broječne vrednosti. Ova vrsta procene ima za cilj da utvrdi koliko će uticaj rizika koštati organizaciju. Umesto da se rizik klasifikuje na skali kao u kvalitativnoj proceni rizika, kvantitativna procena rizika dodeljuje riziku konkretne vrednosti. Suštinska razlika između kvalitativnog i kvantitativnog pristupa riziku je da se kvantitativna analiza oslanja na podatke, dok se kvalitativna procena zasniva na subjektivnim procenama pojedinaca. Još jedna razlika između ova dva pristupa je način na koji se rizik vrednuje. Dok se u kvalitativnoj proceni rizik koji se smatra bezopasnim može označiti kao nizak, u kvantitativnoj proceni taj rizik će biti bliže kvantifikovan kako bi se ukazalo na mogućnost njegovog ostvarenja ili potencijalne štete koju može izazvati. Ova metoda se često koristi pri velikim nezgodama. Kvantitativne procene rizika često se predstavljaju u obliku matrica rizika ili registara, koji vizuelno prikazuju rizike zajedno sa njihovim posledicama i verovatnoćom. Na osnovu nivoa rizika i mogućih ishoda, donosiocima odluka omogućava se da postave prioritete i raspodele resurse. U slučaju da se određeni rizici mogu kvantifikovati, a neki ne mogu pa se pristupa subjektivnoj proceni, metoda postaje polu-kvantitativna procena rizika [116][117].

Budući da je u ovoj doktorskoj disertaciji fokus na kvantitativnoj analizi rizika i kombinaciji metoda za procenu rizika, posebna pažnja će biti posvećena tome u sledećim potpoglavljima.

### 3.1.2. Kvantitativna analiza rizika

Kvantitativna analiza rizika je široko rasprostranjena sistematska metoda zasnovana na vrednosnim podacima za procenu i merenje opasnosti, koja može biti primenjena na rudarskim aktivnostima između ostalog. Kvantitativna analiza rizika ima značajne prednosti, jer ne samo da pomaže u identifikaciji i rangiranju faktora koji doprinose riziku, već pomaže i u određivanju prioriteta za usmeravanje napora na smanjenje rizika, čime se postiže optimalan rezultat. S obzirom na to da rudarstvo spada u rizičnije industrije, sa opasnostima kao što su klizišta, rušenje nasipa na jalovištima i kvarovi rudarske opreme koji predstavljaju ozbiljne pretnje, kvantitativna procena rizika

pruža metodičan pristup za procenu verovatnoće i ozbiljnosti tih rizika. Dodeljujući brojčane vrednosti potencijalnim rizicima i njihovim posledicama, ova metoda pomaže donosiocima odluka da postave bezbednosne prioritete, efikasnije raspodele resurse i uredno ispune zakonske obaveze. Te prednosti kvantitativne analize je čine izuzetno pogodnom za analizu rizika u industriji kao što je rudarstvo, gde je prisutan niz ozbiljnih rizika i strogih propisa.

Identifikacija opasnosti predstavlja prvi korak u procesu, tokom kojeg se identifikuju potencijalni rizici koristeći stručna mišljenja, istorijske podatke i prediktivno modeliranje. Sledeći korak je procena verovatnoće, kada se statistički utvrđuje verovatnoća da će se neki događaj dogoditi. Mogući efekti na rad, infrastrukturu, životnu sredinu i ekonomske performanse se procenjuju analizom posledica nakon što je utvrđena verovatnoća. Ovi efekti mogu uključivati pogoršanje stanja životne sredine, finansijske gubitke, prekide u radu, povrede i smrtne slučajeve.

Rudarske kompanije mogu unaprediti i prilagoditi donošenje odluka i razviti strategije za ublažavanje rizika nakon procene, kao i strategije za buduće delovanje u cilju ojačavanja slabih tačaka u sistemu. Ova procedura osigurava usklađenost sa propisima, poboljšava ukupnu operativnu efikasnost i smanjuje mogućnost neželjenih događaja.

Kako bi se sprovedla kvantitativna analiza rizika projekta ili poslovnog procesa, neophodni su kvalitetni podaci, jasna poslovna strategija, dobro razvijen model projekta i prioritarna lista rizika vezanih za poslovanje ili projekat. Da bi se utvrdile vrednosti efekata koje rizik može imati i verovatnoća njegovog pojavljivanja, kvantitativna procena rizika oslanja se na merljive i realne brojeve. Rezultati ove procene su relevantni izvan konteksta analize, jer se temelje na matematičkim i statističkim principima, a mogu predstavljati vrednosti rizika u monetarnom smislu. To je posebno značajno jer su novčani gubici kao koncept veoma jasni svim kompanijama i poslodavcima. U kvantitativnoj proceni, najčešći problem je nedostatak dovoljno podataka za analizu. Takođe, može biti izazovno izraziti neku vrednost koristeći numeričke podatke, ili može postojati prevelika količina relevantnih faktora. Zbog toga je analiza rizika tehnički zahtevna.

Neke od najviše korišćenih alata za kvantitativnu procenu rizika su [126]:

- Heurističke metode - Metode zasnovane na iskustvu ili stručnosti za procenu nepredviđenih okolnosti,
- Procena u tri tačke - Metoda koja koristi optimistične, najverovatnije i pesimistične vrednosti za određivanje najbolje procene,
- Analiza stabla odlučivanja - Dijagram koji pokazuje implikacije izbora različitih alternativa,
- Očekivana novčana vrednost (engl. *Expected monetary value* - EMV) - Metoda koja se koristi za uspostavljanje rezervi za nepredviđene slučajeve za budžet i raspored projekta ili poslovnog procesa,
- Monte Karlo simulacija - Metoda koja koristi optimistične, najverovatnije i pesimistične procene za određivanje troškova poslovanja i datuma završetka projekta,
- Analiza osetljivosti - Metoda koja se koristi za određivanje rizika koji ima najveći uticaj na projekat ili poslovni proces,
- Analiza stabla grešaka (engl. *Fault tree analysis* - FTA) - Sistematska, grafička metoda koja se koristi za analizu potencijalnih uzroka kvarova sistema sa pristupom odozgo nadole,
- Analiza režima i efekata otkaza (engl. *Failure mode and effects analysis* - FMEA) - Analiza koja koristi pristup odozdo prema gore, gde se procenjuju potencijalni načini otkaza pojedinačnih komponenata.

### 3.1.2.1. RCM - Održavanje usredsređeno na pouzdanost

Održavanje usredsređeno na pouzdanost (engl. *Reliability Centred Maintenance* - RCM) je metoda za procenu rizika koja prema ISO 31010 može da se primeni u svim koracima procene rizika. RCM predstavlja program koji spaja inženjerske metode u sistematskom pristupu s ciljem da se obezbedi da oprema zadrži svoj prvobitni nivo funkcionalnosti [127][128], odnosno da se konstantno

održava dobar kvalitet rada vodeći računa o funkcionisanju sredstava za rad. Služi za identifikaciju politika koje treba primeniti za upravljanje otkazima kako bi se efikasno i efektivno postigla potrebna sigurnost, raspoloživost i ekonomičnost rada za sve vrste opreme. RCM je dokazana i prihvaćena metodologija, koja se praktično koristi u svim industrijama. Ona definiše proces odlučivanja za identifikaciju primenljivih i efikasnih načina preventivnog održavanja opreme u skladu sa bezbednosnim, operativnim i ekonomskim posledicama otkaza od identifikovanih uzroka. Postavljen je da obezbedi održivu sigurnost osoblja i životne sredine, kao i usvojene operativne i ekonomske parametre u odnosu na sve vrste aktivnosti. Generalno se primenjuje u svim fazama projektovanja, razvoja, rada i održavanja [129].

Efikasna primena RCM zavisi od dobrog interaktivnog poznavanja opreme i tehnologije rada, operativnog okruženja i povezanosti elemenata i sistema u odnosu na sve moguće otkaze i posledice. Osnovni faze realizacije RCM svakog programa su [129]:

- Pokretanje i planiranje,
- Analiza funkcionalnog kvara,
- Izbor rešenja,
- Implementacija,
- Kontinuirano unapređivanje.

Metoda RCM podržava sve osnovne korake u proceni rizika sa analizom vrste otkaza, efekata i kritičnosti (FMECA) uz specifičan pristup i sa korišćenjem Markovljevih analiza i Blok dijagram pouzdanosti (engl. *Reliability Block Diagram* - RBA), posebno kada su u pitanju višestruki otkazi. Identifikacija rizika se fokusira na situacije u kojima potencijalni otkazi mogu biti eliminisani ili smanjena učestalost uz usvojeno održavanje. Posledice se utvrđuju definisanjem efekata otkaza. Matrica rizika koja kombinuje verovatnoće otkaza i odgovarajuće posledice omogućava utvrđivanje prioriteta u odnosu na stepen rizika. Procena rizika se zatim vrši izborom odgovarajuće strategije upravljanja otkazima za svaki način kvara. Prikupljanje podataka o otkazima, obnavljanju i održavanju omogućava praćenje rezultata programa i primenu neophodnih ispravki. Ceo RCM proces treba da bude opširno dokumentovan za buduću upotrebu i pregled. Prikupljanje podataka o otkazima i održavanju omogućava praćenje rezultata i implementaciju poboljšanja.

Pre nego što se započne sa detaljnom RCM analizom i definisanjem zahteva, važno je sastaviti detaljan pregled tehnoloških sistema koji će biti predmet održavanja, kao i sprovesti temeljno upoznavanje sa proizvodnim procesom. Nakon što se ova dva bitna koraka realizuju, za svaki od definisanih tehnoloških sistema potrebno je postaviti sedam osnovnih pitanja u okviru koncepcije RCM i pružiti detaljne odgovore na svako od njih [130]. Ta ključna pitanja su:

- 1) Koje su funkcije opreme bitne u tekućoj eksploataciji?
- 2) Koji se otkazi opreme mogu pojaviti?
- 3) Koji su uzroci pojave otkaza?
- 4) Šta se događa kada se pojavi otkaz?
- 5) Koliki je značaj svakog otkaza?
- 6) Šta se može uraditi da se spreči pojava otkaza?
- 7) Šta treba preduzeti, ako ne može da se pronađe pogodna preventivna aktivnost?

U okviru RCM procene rizika, nakon detaljnog utvrđivanja proizvodnog procesa, potrebno je ustanoviti posledice otkaza određenog elementa, i načina na koji taj otkaz konkretnog elementa utiče na druge elemente u sistemu. Za ovaj deo analize, može se iskoristiti niz metoda za analizu rizika, a najčešće se koriste FMEA i nadograđena verzija FMECA (engl. *Failure modes, effects, and criticality analysis* - Analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza). Osim ove dve metode, mogu se koristiti još i studije opasnosti i operabilnosti (engl. *Hazard and operability studies* - HAZOP), analiza stabla grešaka (engl. *Fault tree analysis* - FTA) itd.

Nakon analize rizika, pristupa se praviljenju taktika i strategija održavanja za svaki potencijalni režim kvara u okviru utvrđenih rizičnih tačaka u sistemu, implementiranje predodređenih taktika održavanja i konstantna revizija, odnosno praćenje i usklađivanje sistema u odnosu na uspešnost preduzetih mera.

Dokazano je da su primene RCM metode višestruke: veća sigurnost rada i zaštita okoline, poboljšanje eksploatacionih performansi (izlazi, kvalitet proizvoda i usluge korisniku), viša ekonomska efikasnost (smanjenje troškova održavanja), produženje životnog veka skupljih delova opreme i samim tim opreme, proširenje baze podataka o održavanju, motivacija radne snage u održavanju i bolji timski rad [130].

### 3.1.2.2. Markovljeva analiza

Markovljeva analiza (engl. *Markov analysis*) je probabilistička metoda koja se koristi kada buduća stanja sistema zavise isključivo od njegovog trenutnog stanja i na osnovu konstantne verovatnoće prelaza u drugo stanje. Specifična je po tome ne daje preporučenu odluku, već daje probabilističke informacije o situaciji, koje onda mogu pomoći donosiocu odluka pri odlučivanju.

Metoda je pogodna za analizu obnovljivih i neobnovljivih sistema koji imaju više stanja više i gde upotreba Blok dijagrama pouzdanosti (RBA) nije u potpunosti odgovarajuća za analizu sistema. Metoda se može po potrebi proširiti na složenije sisteme korišćenjem Markovljevih procesa višeg reda. Vrsta analize je kvantitativna i može biti diskretna (koristeći verovatnoće promene između stanja) ili neprekidna (koristeći intenzitete prelaza između stanja).

Upotreba Markovljevog modela za analize se odnosi na različite strukture sistema, sa ili bez obnavljanja, kao i na izračunavanje raspoloživosti, uključujući uzimanje u obzir rezerve komponenti za obnavljanje. Efikasno se koristi i za procenu rizika uticaja na životnu sredinu (engl. *Environmental Risk assessment - Toxicity assessment*) u skladu sa ISO/IEC vodičem 51:2015 (engl. *Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards*). Ovaj proces prati procenu i tretman prihvatljivih i neprihvatljivih rizika u delu koji se odnosi na izloženost opasnosti po životnu sredinu za biljke, životinje i ljude. Metoda uključuje analizu verovatnoće pojave opasnosti od svakog uzroka na ciljnu populaciju i puteve kojima opasnost može da dođe do osetljive ciljne populacije.

Za svako korišćenje, pored preciznog definisanja mogućih prelaza iz stanja u stanje koje je neophodno modelirati, za Markovljevu analizu je neophodno utvrditi listu različitih mogućih stanja u kojima sistem, podsistem ili komponenta sistema funkcioniše i verovatnoće prelaza između stanja za diskretne događaje, ili intenzitete otkaza i/ili intenzitete obnavljanja za neprekidne događaje.

Velika prednost Markovljeve analize je mogućnost proračuna verovatnoća za obnovljive sisteme sa više prelaznih stanja, dok su nedostaci vezani za sledeća ograničenja:

- Pretpostavka o konstantnim verovatnoćama promene stanja (otkaz i obnavljanje),
- Svi događaji su statistički nezavisni pošto su buduća stanja nezavisna od svih prošlih stanja, osim prethodnog prelaznog stanja,
- Neophodno je poznavanje svih verovatnoća promene stanja,
- Rezultate je teško objasniti netehničkom osoblju.

### 3.1.2.3. FMEA - Analiza režima i efekata otkaza

FMEA (engl. *Failure mode and effects analysis* - Analiza režima i efekata otkaza) je metoda koja se koristi za analizu mogućih otkaza i njihovih posledica. To je sistematski pristup za identifikaciju i prevenciju problema pre nego što se pojave, u sistemima, procesima, aktivnostima i konačno u samim proizvodima. Ova metoda je razvijena kao induktivni pristup i primenjuje se u oblasti održavanja i pouzdanosti sistema. FMEA se fokusira na prevenciju odstupanja, unapređenje bezbednosti i povećanje zadovoljstva korisnika, pri čemu se termin otkaz može shvatiti šire, kao bilo koja vrsta odstupanja.

Analiza režima i efekata otkaza je metoda koja se koristi za identifikaciju uzroka i posledica zbog kojih komponente, sistemi ili procesi ne mogu da ispune svoju namenu. FMEA identifikuje [131]:

- Sve potencijalne uslove otkaza različitih elemenata sistema ili procesa;
- Efekte koji ovi kvarovi mogu imati na sistem ili proces;
- Mehanizme otkaza;

- Kako izbeći otkaze i/ili ublažiti efekte otkaza na sistem ili proces.

Glavni rezultat primene FMEA metode je procenjena veličina rizika, koja se kvantitativno izražava RPN brojem. Ovaj broj se koristi za utvrđivanje prioriteta prilikom definisanja i implementacije odgovarajućih mera s ciljem eliminacije ili smanjenja rizika.

Prema ovoj metodi relativni rizik od nastanka neželjene pojave (odstupanja), određuje se na osnovu tri faktora:

1. Ozbiljnost posledica - potencijalne posledice odstupanja, ukoliko dođe do nje,
2. Verovatnoća pojave - verovatnoća pojave odstupanja ili učestalost njenog ponavljanja  $i$
3. Mogućnost otkrivanja - verovatnoća otkrivanja odstupanja pre nego što se ispolje njegove posledice.

Numerički prioritet (kvantifikacija) rizika (RPN broj) se jednostavno računa množenjem ocena sva tri faktora za svaku pojedinačnu vrstu odstupanja i njene posledice.

$$\text{RPN} = \text{posledica} \times \text{verovatnoća pojavljivanja} \times \text{verovatnoća otkrivanja}$$

Na osnovu dobijenog RPN broja određuju se prioriteti za pojedina odstupanja, a njegovo snižavanje nakon sprovođenja preporučenih mera predstavlja pokazatelj uspešnosti celokupne FMEA analize [132].

Metoda FMEA se sastoji od deset procesnih aktivnosti prikazanih u Tabeli 3.1.2.3.1. Kako se iz Tabele vidi, metoda predstavlja zaokružen proces analize sistema, identifikacije potencijalnih odstupanja i ocene rizika (ozbiljnost posledice, verovatnoća pojave, verovatnoća otkrivanja), a zatim na bazi proračunatog RPN broja (kvantifikacije rizika) i rangiranja rizika određuju se prioriteti i primena odgovarajućih mera u cilju eliminacije ili smanjivanja intenziteta rizika. Pozitivna strana ove metode, koja je prepoznata i u praksi, jeste to što se u poslednjem koraku vrši izračunavanje preostalog rizika nakon implementacije predviđenih mera. Kako je metoda iterativna omogućuje da se rizicima u kontinuitetu upravlja [132].

**Tabela 3.1.2.3.1. Procesne aktivnosti FMEA postupka [132]**

Redosled	Aktivnost
1	Preispitivanje sistema
2	Detekcije potencijalnih odstupanja
3	Formiranje liste potencijalnih efekata za svaku grupu odstupanja
4	Ocenjivanje ozbiljnosti posledica za svaku vrstu odstupanja
5	Ocenjivanje verovatnoće pojave za svaku vrstu odstupanja
6	Ocenjivanje mogućnosti otkrivanja za svaku vrstu odstupanja i/ili njenog efekta
7	Proračun RPN broja za svaku vrstu odstupanja
8	Određivanje prioriteta za odstupanja koje zahtevaju primenu određenih mera
9	Sprovođenje mera u cilju eliminacije ili smanjivanja odstupanja sa visokim nivoom rizika
10	Proračun preostalog rizika nakon sprovođenja predviđenih mera

FMEA nudi velike prednosti olakšavanjem proaktivne prevencije kvarova, smanjenjem troškova i povećanjem produktivnosti. FMEA poboljšava ukupne performanse smanjenjem neplanskih troškova zahvaljujući ranom uočavanju mogućih problema. Prepoznavanjem potencijalnih kvarova unutar koncepta i ispitivanjem njihovih posledica, FMEA pomaže u odabiru optimalnih opcija dizajna. Takođe može da odredi koji zahtevi za testiranje treba da se primenjuju na nivou sistema. Omogućava efikasno planiranje testiranja i smanjenje rizika tako što klasifikuje ove greške prema uticaju. Takođe može da prati modifikacije dizajna za rešavanje potencijalnih problema u budućnosti FMEA je korisna metoda za otkrivanje mogućih opasnosti, ali takođe ima niz nedostataka koje treba uzeti u obzir. Jedan značajan problem je što često dodeljuje visoke ocene

ozbiljnosti čak i u slučajevima kada su male šanse za pojavu ili otkrivanje. Uspostavljanje preciznih pravila za ono što bi trebalo ocenjivati je ključno za uspešan FMEA, što zahteva sveobuhvatnu i dugotrajnu analizu operacija. Još jedan nedostatak je što FMEA ne rešava odmah probleme koje identifikuje, već samo nudi procene. Da bi se pozabavile tim problemom i smanjile rizike, organizacije i moraju da preduzimaju dodatne mere predostrožnosti. Pored toga, iskustvo tima ili pojedinca koji izvodi FMEA ima značajan uticaj na njegovu efikasnost. Da bi se osigurala optimalna efikasnost u sprečavanju kvarova, robustan FMEA proces zahteva rigoroznu evaluaciju u svakoj fazi, počevši od početnog dizajna [133].

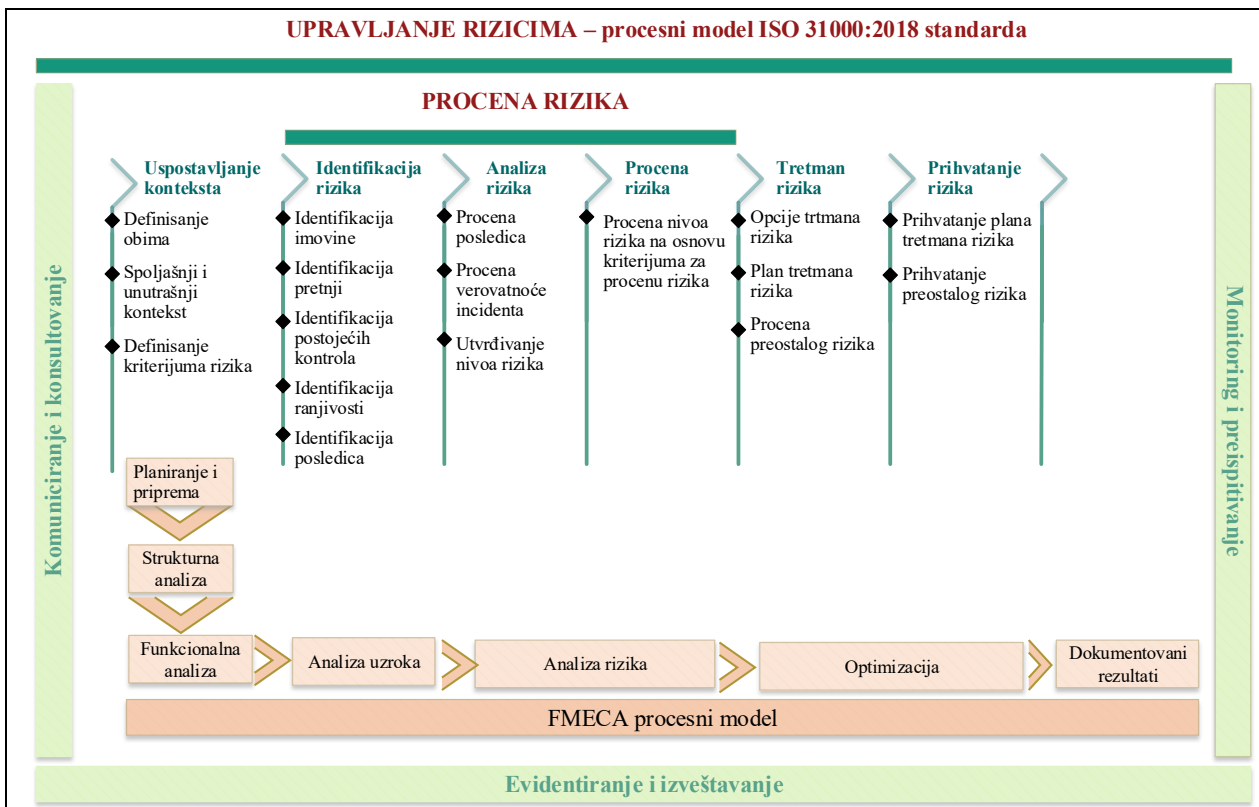
#### 3.1.2.3.1. FMECA - Analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza

Budući da je FMEA jednostavna polu-kvantitativna metoda, postoji i nadogradnja te metode dodavanjem analize kritičnosti otkaza, pod nazivom FMECA (engl. *Failure modes, effects, and criticality analysis* - Analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza).

U FMECA metodi se nakon standardne FMEA metode nastavlja klasifikovanje identifikovanih uzroka otkaza prema njihovoj kritičnosti, uobičajeno na osnovu broja prioriteta rizika (RPN) kao polu-kvantitativne procene kritičnosti. Nivo rizika se dobija proizvodom procenjenih posledica svakog uzroka otkaza i verovatnoće otkaza. Koristi se za sisteme ili procese, kada se posledice različitih uzroka otkaza razlikuju. Nivo rizika se može izraziti kvalitativno ili kvantitativno [131].

FMECA ima nekoliko prednosti. Pomaže u identifikaciji i određivanju prioriteta kvarova na osnovu njihovog potencijalnog uticaja na performanse ili bezbednost sistema, omogućavajući organizacijama da efikasno alociraju resurse tako što će se prvo baviti najkritičnijim problemima. Takođe omogućava rano otkrivanje mogućih načina kvarova tokom faze projektovanja ili rada, podstičući strategije preventivnog održavanja koje povećavaju pouzdanost i smanjuju vreme zastoja. Autori Kouassi i drugi, uspeli su uz pomoć FMECA metode da odlično prikažu i ocene operativne rizike na primeru rudnika mangana, i zaključili da su sledeći operativni rizici rudnika najvećeg nivoa opasnosti: noćno kretanje mehanizacije (opis rizika: nesreća uzrokovana distrakcijom vozača ili nedostatkom adekvatnog osvetljenja na licu mesta) i restrikcija ruta pri transportu (opis rizika: nesreća, povreda ili gubitak života, skretanje sa puta, neplanirana promena putanje kretanja) [134]. FMECA ima i nekoliko ograničenja. Metoda se u velikoj meri oslanja na stručnost i procenu analitičara, što dovodi do potencijalnih nedoslednosti u određivanju prioriteta režima neuspeha. Pored toga, predviđanja su zasnovana na istorijskim podacima i znanju stručnjaka, što je čini manje efikasnom u predviđanju budućih neuspeha uzrokovanih nepredviđenim interakcijama ili faktorima okoline. Pošto je FMECA tipično jednokratna analiza, možda neće uzeti u obzir promene sistema tokom vremena ili nove kvarove koji proizilaze iz evoluirajućih tehnologija ili uslova rada [133].

FMECA metoda, koja je preporučena međunarodnim ISO 31000 standardom, se može koristiti i preventivno i korektivno, s tim što je mnogo povoljnije da se koristi preventivno, kada to uslovi dozvoljavaju. FMECA metoda se i u rudarskoj industriji koristi za analizu potencijalnih otkaza i njihovih posledica. To je funkcionalna, induktivna, procesna metoda za identifikaciju i sprečavanje otkaza pre nego što oni nastanu, u sistemima, procesima, aktivnostima i kvalitetu proizvoda rudarske industrije. Ima izuzetnu primenu u oblasti održavanja i pouzdanosti sistema. Na Slici 3.1.2.3.1.1. prikazana je usklađenost FMECA procesnog modela sa ISO 31000:2018 procesnim modelom upravljanja rizicima [113].



Slika 3.1.2.3.1.1. Usklađenost FMECA procesnog modela sa ISO 31000:2018 procesnim modelom upravljanja rizicima [113]

Ova metoda omogućava jednostavan proces identifikacije i procene ekoloških rizika i verovatnoće otkaza na nivou analiziranog rudarskog sistema u celini ili njegovih podsistema do pojedinačnih elemenata. Metoda se sprovodi timski ispunjavanjem unapred definisane forme FMECA izveštaja i proračunom tradicionalnog FMEA broja prioriteta rizika (engl. *Risk Priority Number* - RPN). Smanjenje rizika nakon sprovođenja preporučenih mera predstavlja pokazatelj uspešnosti celokupne FMECA analize. Kao što je već pomenuto, RPN se opet dobija množenjem stepena posledica otkaza *S* (*Severity*), verovatnoće očekivane pojave uzroka otkaza *O* (*Occurrence*) i mogućnosti otkrivanja *D* (*Detection*) svakog uzroka:

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

Prema svetskoj literaturi, najčešće se za svaki od tri navedena parametra uzimaju vrednosti u intervalu od 1 do 10, a ređe u manjem intervalu. RPN se može kretati u intervalu od 1 do 1000 u zavisnosti od raspona intervala *S*, *O* i *D*. Manji RPN broj je povoljniji sa manjim rizikom, dok je veći nepovoljniji sa većim rizikom. Kada se identifikuje potencijalni uzrok otkaza (eko)sistema, mogu se preduzeti odgovarajuće korektivne aktivnosti za eliminaciju opasnosti ili stalnu redukciju potencijalne pojave otkaza. Karakteristike ove metode su:

- Jednostavnost primene,
- Pruža mogućnosti sprovođenja analize rizika u više iteracija,
- Otkriva:
  - potencijalne kritične uzroke otkaza,
  - posledice ovih otkaza,
  - mehanizam nastanka ovih otkaza,
  - način izbegavanja, odnosno, smanjenja posledica.

FMECA ima iste procesne aktivnosti kao FMEA (Tabela 3.1.2.3.1.), sa dodatkom analize kritičnosti, time omogućavajući identifikaciju kritične tačke otkaza i određivanje verovatnoće kvara. FMECA procenjuje kritičnost režima otkaza i rangira ih na osnovu prioriteta (ili nivoa kritičnosti).

I pored toga što je FMECA metoda koja je definisana i preporučena u različitim standardima, i sa FMEA u aktivnoj upotrebi već sedam decenija, stručna i naučna javnost je identifikovala neke nedostatke i ograničenja koje su objavljene u brojnim radovima. One se posebno odnose na standardno primenjivanu metodu polu-kvantitativnog rangiranja rizika preko RPN broja.

Uočeni nedostaci i ograničenja metoda FMEA i FMECA uglavnom su vezani za ekspertske tim i posebno za metodologiju određivanja brojčane vrednosti S, O i D, izračunavanje RPN broja i određivanje prioriteta rizika. Uticaj ljudskog faktora u sprovođenju ovih metoda vezan je za subjektivnost, savest i obučenosć članova ekspertske tima koji sprovodi analizu. Direktna posledica ovih nedostataka i ograničenja je pouzdanost utvrđivanja grešaka, posledica, uzroka kao i S, O i D parametara od strane eksperata tima, što na kraju dovodi do relativnosti pouzdanosti FMECA analize. Proceduralno nije predviđen pristup stalnog unapređenja i obaveznog rešavanja pojave odstupanja, već se najčešće rešavaju samo rizici čije vrednosti RPN broja ili vrednosti S, O, D parametara prelaze prihvatljivi nivo. Zato su najveći nedostaci i ograničenja ovih metoda vezani za metodološki pristup definisanja parametara i izračunavanje RPN. Ovi nedostaci dokumentovani su u preglednoj studiji autora Liu H.C. i drugih, u kojoj je analizirano oko 75 naučnih radova [135]. Može se zaključiti da RPN, koji se koristi u tradicionalnim metodama FMEA/FMECA, ne nudi doslednu procenu rizika, te da je prilično ograničen u pogledu svoje sposobnosti poređenja, raspona intervala kriterijuma i integrisanja informacija o riziku.

Za rudarsku, ali i svaku drugu industriju je važno da primenjena metoda upravljanja ekološkim rizicima ne bude samo alat jednostavan za korišćenje i razumevanje, već i kvantitativni alat izgrađen na probabilističkim osnovama, sa kojim mogu pouzdanije da se upravljaju rizici u različitim situacijama i okruženjima. FMECA metoda ima veliki potencijal da kroz modifikacije i poboljšanja bude koristan alat za procenu i upravljanje rizicima u domenu rudarske industrije.

#### 4. ANALIZA EKOLOŠKIH RIZIKA U POVRŠINSKOJ EKSPLOATACIJI MODIFIKOVANOM METODOM

Površinski kop se može predstaviti kao geo-tehnički sistem sa vezom i međusobnim uticajem prirodnog podsistema i tehničkog/rudarskog podsistema, koji obuhvata, pored kopa u užem smislu, i infrastrukturu, objekte i upravljanje uključujući i potrebe za mineralnom sirovinom. Ključno je razumeti međusobni uticaj između prirodnog podsistema i rudarskog podsistema. Ekološki uticaj tehničkog podsistema površinske eksploatacije je uveliko sagledan u svetskoj praksi i dominantno se odnosi se na narušavanje zemljišta, izmenu stanja i karakteristika živog sveta, podzemnih i površinskih voda, kao i atmosfere (Slika 4.1.). Obrnuto, sa aspekta ekstremnih negativnih uticaja prirodnog podsistema na površinsku eksploataciju se, preko atmosfere i nepredviđenih ekstremnih uvećavanja nivoa površinskih i podzemnih voda, ozbiljno pa i dugoročnije ugrožava planirana proizvodnja [120], posebno u uslovima prethodno pomenutih globalnih klimatskih promena. Prirodne izmene u litosferi znatno utiču na eksploataciju, uključujući i seizmiku, koja obuhvata nepredviđene promene geomehaničkih karakteristika radne sredine, bilo da je reč o otkrivci ili mineralnoj sirovini, a takođe i geološka neizvesnost preko varijacije količina i kvaliteta mineralne sirovine u ležištu. Svi navedeni uticaji prirodnih negativnih procesa, dovode do ekonomskih posledica vezanih za sanacije, ali i gubitke u odnosu na planiranu proizvodnju površinskih kopova. Osnovu za sagledavanje slučajnih procesa prirodnog podsistema i rizika zbog nastanka negativnih ekstremnih događaja sa uticajem na proizvodnju, čini procena verovatnoća pojava i rizika takvih stanja i nivoa posledica sa ekonomskog aspekta [124][136][137][138].



Slika 4.1. Struktura povezanosti prirodno-tehničkog ekosistema površinske eksploatacije

Na osnovu prethodno navedenog se može zaključiti da postoje dvosmerni uticaji na relaciji prirodnog i rudarskog podsistema:

- Prirodni nekontrolisani uticaji na površinski kop i
- Kontrolisani uticaji površinskog kopa na životnu sredinu.

Dakle ekološki rizici u površinskoj eksploataciji mogu biti podeljeni u dve kategorije: nekontrolisani rizici, koji su povezani sa spoljnim faktorima čija se pojava ne može predvideti u bliskoj budućnosti i tipično se odnose na konturu kopa u trenutku događaja, i kontrolisane rizike, koji su predvidivi i mogu imati kratkoročno planiranu kontrolu u zoni površinskog kopa.

Težnja ka održivoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina u skladu sa neophodnom zaštitom životne sredine na najboljem svetskom nivou podrazumeva kombinaciju kontrolisanja uticaja površinskog kopa na životnu sredinu i umanjeња prirodnih nekontrolisanih uticaja na površinski kop. Šteta nastala od prirodnih nekontrolisanih uticaja na površinski kop je dvostruka, predstavlja pretnju

po radnu i životnu sredinu u zoni površinskog kopa, a takođe i pretnju po ostvarivanje planiranih kapaciteta kopa. U cilju sprečavanja takvih ishoda, važno je detaljno proceniti potencijalne rizike, a zatim pristupiti preduzimanju mera za smanjenje verovatnoća loših ishoda.

Najizraženiji primeri negativnih uticaja prirodnih faktora su poplave i klizišta (Slika 4.1. i Slika 4.3.), iako klizišta često nastaju i kao posledica loše rudarske tehnološke discipline.



*Slika 4.2. Poplavljen površinski kop Tamnava - Zapadno polje (2014. godina)*



*Slika 4.3. Klizište na površinskom kopu Polje E (2024. godina)*

Sve faze razvoja površinskog kopa, od istražnih i pripremnih radova do otvaranja kopa, dostizanja pune proizvodnje, zatvaranja i perioda nakon zatvaranja, karakterišu negativni uticaji na životnu sredinu različitog intenziteta. U fazama pripreme, otvaranja, dostizanja pune proizvodnje i zatvaranja površinskog kopa dolazi do određenih tehničko-tehnoloških i fizičko-hemijskih uticaja. Ekološka komponenta održive površinske eksploatacije obuhvata potrebu za razmatranjem različitih prostornih efekata, uključujući fizičko zauzimanje prostora, postavljanje ograničenja, valorizaciju i smanjenje dostupnih prirodnih resursa, kao i sveobuhvatnu transformaciju prostora.

Rizici po životnu sredinu i društvo u kontekstu troškova postaju sve važniji. Nekontrolisani rizici mogu imati katastrofalne efekte na rudarstvo i dovesti do dugotrajne privremene obustave rada i potpunog zatvaranja površinskog kopa sa značajnim gubicima. Ovi rizici se posebno odnose na ekološke probleme. Pre svega, to su prirodne katastrofe, koje postaju sve više učestale kao rezultat klimatskih promena. Brojni događaji, uključujući zemljotrese, klizišta, poplave, devastaciju infrastrukture, društvene nemire, pa čak i epidemije bolesti, mogu dovesti do krizne situacije koja bi uključila i površinski kop [14].

Tabela 4.1. prikazuje važne kontrolisane uticaje površinske eksploatacije na životnu sredinu i nekontrolisane prirodne uticaje.

**Tabela 4.1. Prikaz kontrolisanih i nekontrolisanih uticaja površinske eksploatacije [14]**

	Aktivnosti	Kontrolisani uticaji na životnu sredinu	Nekontrolisani uticaji životne sredine
Otvaranje kopa i eksploatacija	Razvoj infrastrukture Uklanjanje otkrivke Eksploatacija	Poremećaj zemljišta Geomehanička stabilnost Erozija Stabilnost proizvodnje u skladu sa studijom o proceni uticaja na životnu sredinu Poremećaj vegetacije Buka Estetika Potrošnja vode i energije Ispuštanje površinskih i podzemnih voda Zagađenje Emisije u vazduh, vodu i zemljište Zaštita biodiverziteta Efikasnost resursa eksploatacije neobnovljivih rezervi mineralnih sirovina	Zemljotresi Poplave Ekstremna klizišta
Zatvaranje kopa	Rehabilitacija Rekultivacija Uklanjanje opreme Uklanjanje infrastrukture Monitoring	Odlaganje otkrivke i flotacijske jalovine Emisije Zaštita biodiverziteta Ispuštanje voda Estetika	Zemljotresi Poplave Ekstremna klizišta

Generalno, površinska eksploatacija i značajan deo neophodnih pratećih delatnosti nosi niz direktnih i indirektnih, stalnih i privremenih složenih prostornih promena i često nepovoljnih uticaja na životnu sredinu, pa sa aspekta analize uticaja čini izrazito kompleksan problem. Negativni uticaji površinske eksploatacije u odnosu na uzrok nastanka uticaja mogu biti direktni i indirektni, a mogu biti [139]:

- Prostorni (promena morfologije terena, uništavanje zemljišta, preseljenje i izmeštanje naselja, preseljenje infrastrukture, izgradnja specifične infrastrukture, izgradnja specifičnih komunikacija);
- Tehničko-tehnološki (klizišta i erozija, sleganje terena zbog odvodnjavanja, buka i vibracije);
- Fizičko-hemijski (fizičko razaranje, zagađenje voda, zagađenje vazduha, hemijska oksidacija, biološko delovanje, mikro klimatske promene i seizmički uticaji),
- Prirodni (klimatske promene, vremenske nepogode).

Pomenuti uticaji, osim prirodnih, su direktni i odnose se na ljude, faunu i floru, vazduh, vodu i zemljište, a prostorno mogu da se manifestuju lokalno, regionalno pa čak i globalno preko delovanja

klime i ekosistema. Indirektni prirodni uticaji se odnose na klimatske promene i prirodne katastrofe, koji delovanjem na sistem površinskog kopa mogu negativno da utiču na eksploataciju, ljude, faunu i floru, vazduh, vodu i zemljište, a prostorno mogu da se manifestuju lokalno, regionalno i globalno. Na Slici 2.2.5.3 je već prikazana veza površinske eksploatacije i uticaja na životnu sredinu u prostoru.

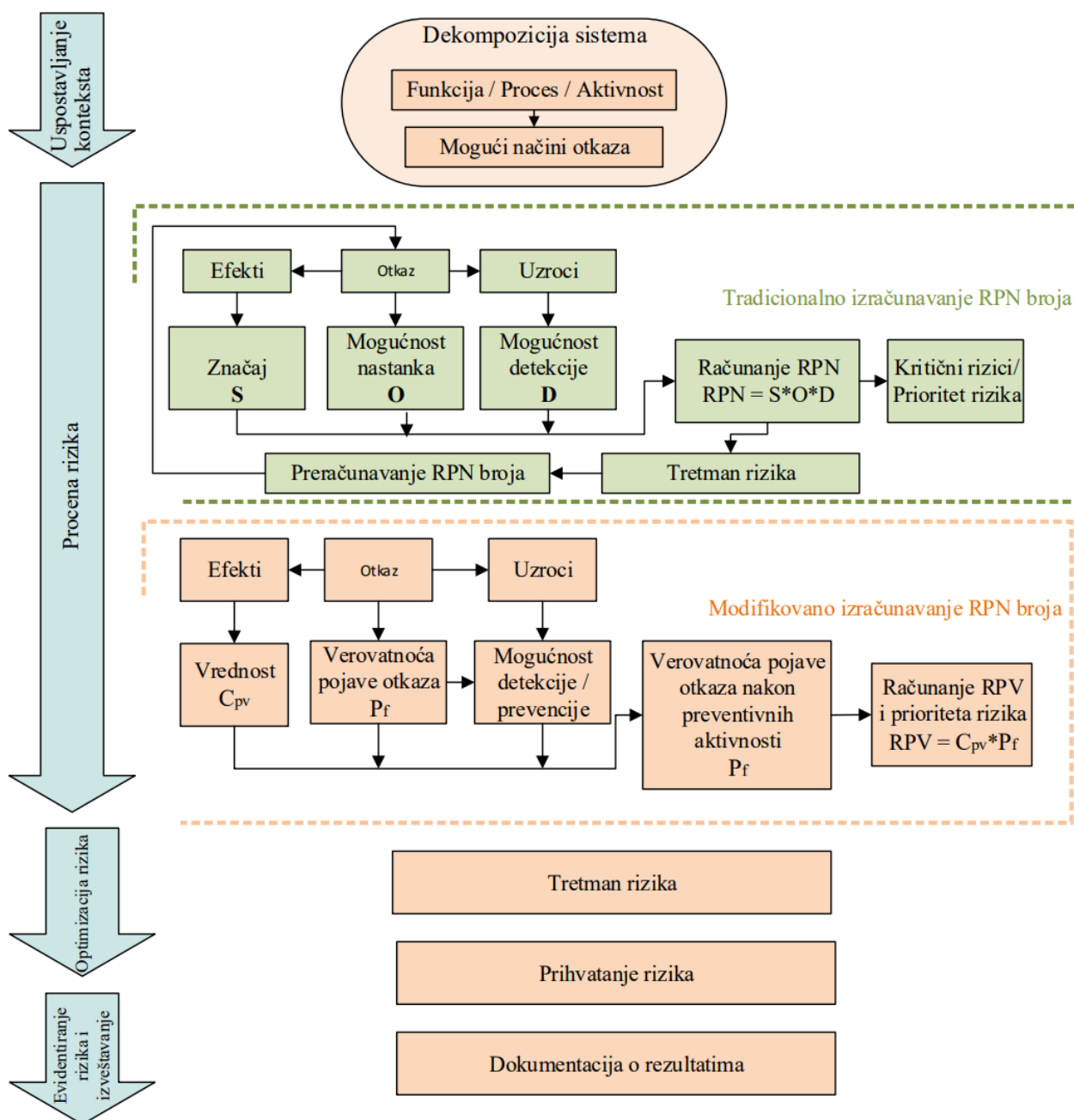
Kao što je ranije napomenuto, efikasnost upravljanja rizikom zavisi od identifikacije uzroka rizika i preduzetih mera za smanjenje mogućih otkaza i njihovih negativnih posledica. Smanjenje verovatnoće otkaza predstavlja znatno efikasniji pristup upravljanju rizicima nego analiza i otklanjanje posledica neželjenih događaja nakon što se već dogode. Rizik se može definisati u zavisnosti od verovatnoće kao nepouzdanost, a njegova vrednost predstavlja nadoknadu vrednosti pouzdanosti do verovatnoće jednake broju 1. To znači da je zbir vrednosti nepouzdanosti i pouzdanosti 1. Kao i u svakom procesu, i u upravljanju rizicima postoji mera efikasnosti koja zavisi od kvaliteta analize procesa i plana upravljanja rizikom, kao i od mera koje se preduzimaju za smanjenje nepouzdanosti i njenih negativnih posledica. Efikasno upravljanje rizikom obuhvata niz aktivnosti usmerenih na prevazilaženje potencijalnih rizika (otkaza), koje se moraju kontinuirano sprovesti tokom celog životnog veka površinskog kopa kako bi se održao prihvatljiv nivo pouzdanosti [14].

U realnosti, rizik može biti prihvatljiv ili neprihvatljiv. Uglavnom kompanija procenjuje šta za nju predstavlja prihvatljiv ili neprihvatljiv rizik, u zavisnosti od fleksibilnosti finansijskih zahteva i faktora dostizanja planirane proizvodnje mineralne sirovine. Prihvatljiv rizik predstavlja rizik koji se može tolerisati bez preduzimanja bilo kakve akcije. On može biti beznačajan, manji ili umeren. Rizik se takođe smatra prihvatljivim kada su troškovi preduzimanja akcije nesrazmerni potencijalnim nagradama, ali se njime može upravljati putem planova ili akcija koje u velikoj meri smanjuju ili minimiziraju posledice opasnosti.

Verovatnoća pojave rizika i njegovi efekti moraju se proceniti kako bi se utvrdila njihova važnost za površinski kop. Kada se radi o specifičnim uzrocima rizika, ova procena može biti ograničena na kvalitativno ili polu-kvantitativno objašnjenje, što je često dovoljno. Nakon toga, može da se sprovede detaljnija i praktičnija kvantitativna analiza, koja uključuje kvantifikaciju i kombinovanje verovatnoće i efekata navedenih rizika. Uzimajući u obzir prethodno iskustvo i podatke, kao i metode i kriterijume za procenu rizika, procenjuje se verovatnoća pojave i uticaj identifikovanih rizika, s naglaskom na složenije i učestalije promene u okruženju.

#### **4.1. Procena rizika modifikovanom kvantitativnom V-FMECA metodom**

Za praktičnu primenu procene rizika u sektoru rudarstva široko je prihvaćena tradicionalna polu-kvantitativna metoda FMECA, ali se u skorije vreme sve više koriste i kvantitativne metode nastale modifikacijom tradicionalne FMECA metode, kakva je i predočena modifikovana vrednosna metoda V-FMECA (engl. *Value-Failure modes, effects, and criticality analysis - Vrednosna analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza*). Ona je u odnosu na konvencionalnu metodu FMECA modifikovana u delu koji se odnosi na analizu rizika. Oslanja se na teorije verovatnoće i pouzdanosti i zadržava jednostavnost FMECA metode, a istovremeno eliminiše kritikovane nedostatke korišćenja konvencionalnog RPN broja. Na Slici 4.1.1. je dat metodološki uporedni prikaz i usklađenost metode FMECA i modifikovane metode V-FMECA. U odnosu na proces upravljanja rizicima, modifikovana V-FMECA metoda sadrži identične procesne aktivnosti i procesni tok kao i FMECA metoda, pa je u tom smislu u potpunosti usklađena i sa procesnim modelom procene rizika datom u ISO 31000:2018 standardu (prethodno poglavlje, Slika 3.1.2.3.1.1.) [113].



Slika 4.1.1. Usklađenost modifikovane V-FMECA i FMECA metoda procene rizika

Model upravljanja ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji koji je prikazan u ovoj disertaciji (engl. *Open Pit Environmental Risk Management - OPERM*) je nastao integracijom proceduralno definisane procene uticaja na životnu sredinu (engl. *Environmental Impact Assessment - EIA*) [140][141] i ekoloških rizika (engl. *Ecological Risk Assessment - ERA*) [142][143], na principima modifikovane V-FMECA metode za analizu i procenu, odnosno, ocenu ekoloških rizika [113] u skladu sa standardom za upravljanje rizicima ISO 31000 [139].

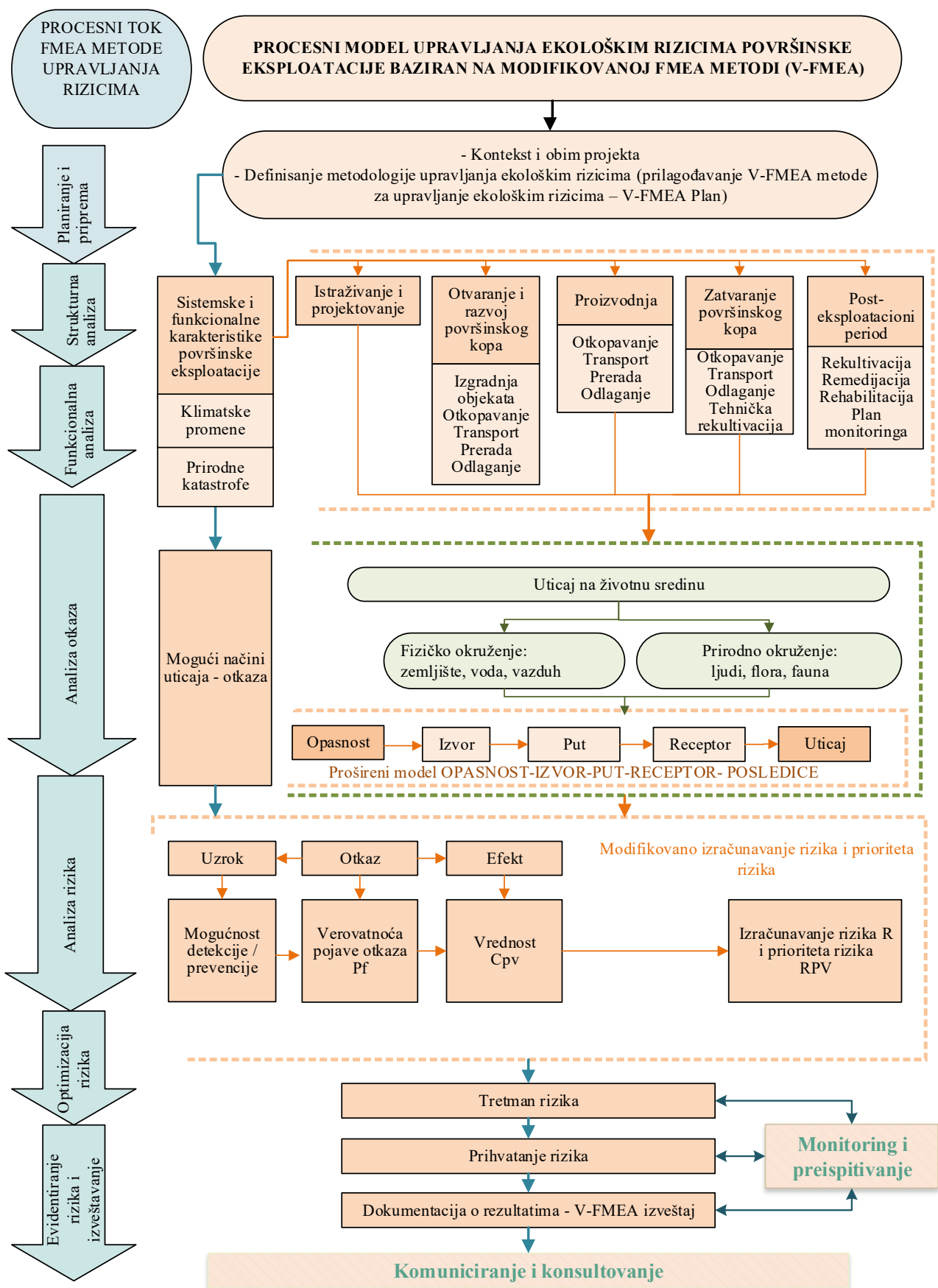
Procena uticaja na životnu sredinu (EIA) se zasniva na razumevanju funkcionisanja prirodnog okruženja i ostvarenja interakcije društva, industrije i ekonomije, kako sa životnom sredinom tako i po pitanjima vezanim za prirodne resurse. Razumevanje prirodnih procesa omogućava predviđanje posledica razvoja. EIA je jedan od najčešće korišćenih alata za upravljanje životnom sredinom i fokusiran je na procenu negativnih efekata na kvalitet životne sredine i zdravlje ljudi. Iako je proceduralno uređena i kao takva prihvaćena, čak i zakonodavno regulisana u gotovo celom svetu, ona ima i značajne nedostatke koji se ogledaju u njenom formalnom i u značajnoj meri kontekstnom

sagledavanju uticaja projekata na životnu sredinu. Glavni nedostatak EIA je što je njen krajnji rezultat generalna procena uticaja, a ne ocena rizika projekta na životnu sredinu [139].

Uz elemente EIA, klasična procena ERA je usmerena na diskretnu procenu rizika kao iterativni proces. Vrednovanje verovatnoća rizika se zasniva na jednostavnom određivanju odnosa izmerenih efekata nastalih zbog izlaganja štetnim uticajima, koji se mogu pojaviti kao rezultat delovanja jedne ili više opasnosti, prema graničnim nivoima negativnih efekata HQ (engl. *Hazard Quotient*). Pored ostalih alata, za procenu je preporučeno i korišćenje probabilističkih modela za kompleksne ekološke promenljive, koje opisuju stanja jedne ili više slučajnih veličina koje nisu diskretne. Preko odabrane uniformne raspodele se procenjuje verovatnoća ekološkog otkaza, kada je  $HQ > 1$  [139].

Kao deo integralnog modela upravljanja ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji u cilju otklanjanja nedostataka EIA, ERA i FMECA pri proceni rizika, korišćen je prošireni model *opasnost-izvor-put-receptor-uticaj* i modifikovana V-FMECA vrednosna probabilistička metoda za analizu i eventualnu procenu ekoloških rizika [139].

Prostorni negativni ekološki efekti su karakteristični, sa manjim i većim intenzitetom, u skoro svim fazama projekta površinske eksploatacije, od istražnih i pripremnih radova, perioda otvaranja površinskog kopa, perioda pune proizvodnje, perioda zatvaranja i post-eksploatacionog perioda (Slika 4.1.2.). Tehničko-tehnološki i fizičko-hemijski uticaji površinske eksploatacije i negativni efekti su intenzivni u periodu pripremnih radova i otvaranja, postizanja pune proizvodnje i zatvaranja površinskog kopa. Negativni ekološki efekti prirodnih uticaja (klimatske promene i prirodne katastrofe) se javljaju kao indirektna posledica ovih uticaja na sistem površinskog kopa [100][144][145]. U periodu posle zatvaranja površinskog kopa nema gotovo nikakvih aktivnih uticaja ili se povremeno javljaju pasivni uticaji, kao posledica svih prethodnih aktivnosti za vreme eksploatacije na površinskom kopu [139].



Slika 4.1.2. Procesni model upravljanja ekološkim rizicima baziran na modifikovanoj V-FMECA metodi

#### 4.1.1. Identifikacija rizika

Zaštita životne sredine, polazeći od načela prevencije i sprečavanja negativnih uticaja, zasniva se na proceni odnosa između uzroka i posledica površinske eksploatacije na životnu sredinu. Za ovu procenu vrlo često se koristi konvencionalni model: *izvor-put-receptor*. U cilju boljeg sagledavanja odnosa između uzroka i posledica u modelu upravljanja ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji OPERM, korišćen je prošireni konvencionalni model: *opasnost-izvor-put-receptor-uticaj* (Slika 4.1.2.) [139]. Primer sagledavanja tog odnosa dat je u Tabeli 4.1.1.1. Suština ovog početnog koraka je detaljna i sveobuhvatna identifikacija ekoloških rizika na površinskim kopovima.

**Tabela 4.1.1.1. Primer sagledavanja opasnosti od poplava i njihovih posledica na površinskom kopu [139]**

<i>Opasnost</i>	<i>Poplava</i>
<i>Izvor</i>	Poreklo opasnosti (jake kiše, intenzivno otapanje snega, izlivanje akumulacija, neplanski tehnički i tehnološki otkazi sistema odvodnjavanja, itd.).
<i>Put</i>	Put kojim opasnost stiže do receptora koji mora postojati da bi se opasnost realizovala.
<i>Receptor</i>	Receptor se odnosi na entitet koji može biti oštećen (osoba, imovina, stanište, rečni tokovi, itd.).
<i>Uticaj</i>	Uticaj poplave može da se izrazi kao ekonomska, socijalna ili ekološka šteta.

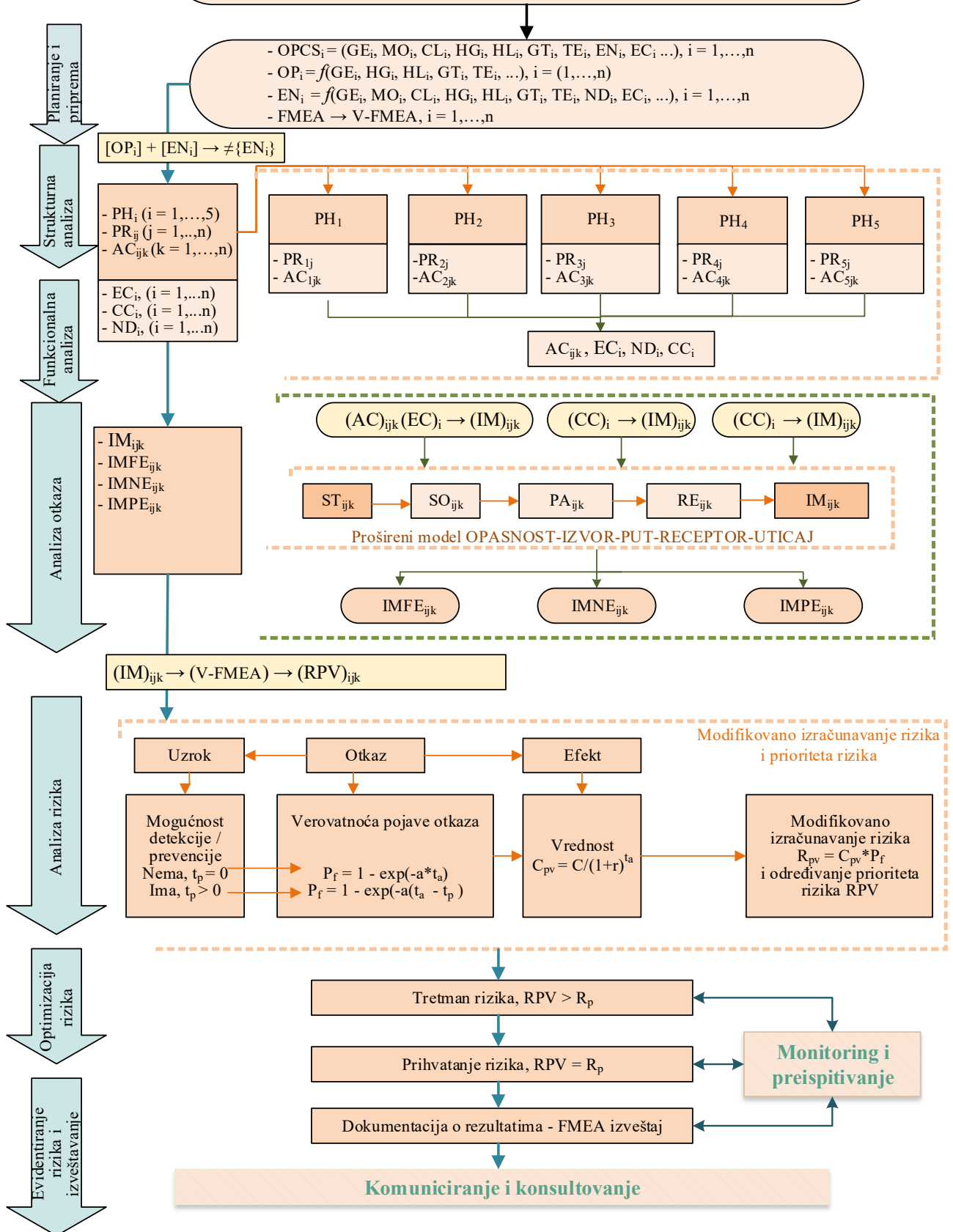
Na primer, u slučaju obilnih padavina (izvor), poplavna voda (put) može da ugrozi objekte ili delove površinskog kopa (receptor) koji mogu direktno da pretrpe materijalnu štetu (uticaj). Indirektno i u životnoj sredini može da nastane šteta (negativan uticaj) [139]. Razumevanje ovih odnosa je ključno za komplikovan sistem delovanja između površinskog kopa i životne sredine.

#### 4.1.2. Analiza rizika

Uz procenu uticaja svih aktivnosti pri realizaciji površinske eksploatacije na životnu sredinu, dalja procena rizika, mogućih posledica i nastalih troškova, predstavlja osnovni praktični materijalizovani deo analize rizika u svim fazama razvoja projekta, koji je podržan mnogim zvaničnim stručnim priručnicima i zakonskom regulativom iz oblasti ekologije [139][146][147][148].

Na Slici 4.1.2.1. je dat matematički prikaz modela upravljanja ekološkim rizicima površinske eksploatacije (OP-ERM) baziran na modifikovanoj V-FMECA metodi, sa detaljnom matematičkom analizom rizika.

**MATEMATIČKI PRIKAZ MODELA UPRAVLJANJA EKOLOŠKIM RIZICIMA  
POVRŠINSKE EKSPLOATACIJE BAZIRANOG NA MODIFIKOVANOJ FMEA METODI  
(V-FMEA)**



Slika 4.1.2.1. Matematički prikaz modela upravljanja ekološkim rizicima površinske eksploatacije baziranog na modifikovanoj V-FMECA metodi

Oznake u matematičkom prikazu modela su sledeće [139]:

### **Površinski kop - Kontekst i obim projekta (engl. *Open Pit - Context and Scope of Project*)**

$OPCS_i = (GE_i, MO_i, CL_i, HG_i, HL_i, GT_i, TE_i, EN_i, EC_i)$ ,  $i = (1, \dots, n)$ , gde je:

GE	Geologija ( <i>Geology</i> )
MO	Morfologija ( <i>Morfology</i> )
CL	Klima ( <i>Climate</i> )
HG	Hidrogeologija ( <i>Hydrogeology</i> )
HL	Hidrologija ( <i>Hydrology</i> )
GT	Geotehnika ( <i>Geotechnics</i> )
TE	Tehnologija ( <i>Mining technology</i> )
EN	Životna sredina/Ekologija ( <i>Environment</i> )
EC	Ekološke komponente ( <i>Ecological components</i> )

### **OP - Sistem površinski kop (engl. *Open Pit System*)**

$OP_i = f(GE_i, HG_i, HL_i, GT_i, TE_i, \dots)$ ,  $i = (1, \dots, n)$

Ponašanje sistema površinskog kopa je u matematičkom modelu predstavljeno matematičkim izrazima odnosa između varijabli. Generalno, izlazna promenljiva ( $OP_i$ ) je funkcija jedne ili više ulaznih promenljivih.

### **EN - Sistem životne sredine (engl. *Environmental System*)**

$EN_i = f(GE_i, MO_i, CL_i, HG_i, HL_i, GT_i, TE_i, CC_i, ND_i, EC_i, \dots)$ ,  $i = (1, \dots, n)$

Ponašanje sistema životne sredine je u matematičkom modelu predstavljeno matematičkim izrazima odnosa između varijabli. Kao i kod sistema površinskog kopa, izlazna promenljiva ( $EN_i$ ) je funkcija jedne ili više ulaznih promenljivih.

### **Definisanje metodologije upravljanja ekološkim rizicima**

$FMECA_i \rightarrow V-FMECA_i$ ,  $i = (1, \dots, n)$

$[OP_i] + [EN_i] \rightarrow \neq [EN_i]$

$[Projekat\ površinske\ eksploatacije] + [Životna\ sredina] \rightarrow [Promenjena\ životna\ sredina]$

PH	Faza površinske eksploatacije ( <i>OPM Phase</i> )
PR	Proces površinske eksploatacije ( <i>OPM Process</i> )
AC	Aktivnost površinske eksploatacije ( <i>OPM Activity</i> )
EC	Ekološka komponenta ( <i>Ecology component</i> )
CC	Klimatske promene ( <i>Climate changes</i> )
ND	Prirodna katastrofa ( <i>Natural disaster</i> )

$(AC)_{ijk} (EC)_{ijk} \rightarrow (IM)_{ijk}$

$(Aktivnost)_{ijk} (Ekološka\ komponenta)_{ijk} \rightarrow (Uticaj)_{ijk}$

IM	Uticaj ( <i>Impact</i> )
IMFE	Uticaj na fizičko okruženje ( <i>Impact on physical environment</i> )
IMNE	Uticaj na prirodno/biološko okruženje ( <i>Impact on natural/biological environment</i> )
IMPE	Uticaj na ljude ( <i>Impact on People</i> )

$(IM)_{ijk} \rightarrow (V-FMECA) \rightarrow (RPV)_{ijk} - (Aktivnost)_i (Komponenta)_j \rightarrow (Uticaj)_{ji} \rightarrow (Predviđanje\ i\ procena) \rightarrow Mere\ ublažavanja \rightarrow (Rezidualni/Preostali\ uticaji)_{ji}$

RPV Prioritetna vrednost rizika (*Risk Priority Value*)

### Analiza uticaja - otkaza

Prošireni konvencionalni model: opasnost→izvor→put→receptor→uticaj

- ST Opasnost (*Stressor*)
- SO Izvor (*Source*)
- PA Put (*Path*)
- RE Receptor (*Receptor*)
- IM Uticaj (*Impact*)

#### 4.2. Procena verovatnoće otkaza, posledica i ekoloških rizika modifikovanom metodom

Analiza rizika ( $R$ ) od otkaza slučajnih procesa, objekata ili opreme u površinskoj eksploataciji, čiji rad može da utiče na ugrožavanje životne sredine, po metodi V-FMECA se metodološki zasniva na osnovnom i poznatom principu po kome je definisana i polu-kvalitativna tradicionalna metoda FMECA, ali uz vrednosni kvantitativni pristup sa analizom mogućih varijanti verovatnoća otkaza  $P_f$ . Saglasno sa klasičnim pristupom, vrednost rizika se dobija množenjem verovatnoće otkaza i odgovarajuće novčane sadašnje vrednosti (engl. *Net Present Value* - NPV) posledica na funkcionisanje, životnu sredinu i ekonomiju površinske eksploatacije po bilo kom uzroku i po svakoj varijanti analize ( $C_{PV}$ ). On istovremeno sa svojom veličinom definiše i prioritet u preduzimanju mera za otklanjanje ili smanjenje rizika (4.2.1.) [144]. Redosled realizacija preventivnih i korektivnih aktivnosti za otklanjanje ili smanjenje posledica rizika bazira se na prioritetoj vrednosti rizika (engl. *Risk Priority Value* - RPV) i novčano se vrednuje kao proizvod verovatnoće otkaza i sadašnje vrednosti troškova nastalih kao posledica otkaza:

$$R = RPV = P_f \cdot C_{PV} \quad (4.2.1.)$$

Gde je:

- R - rizik,
- RPV - prioriteta vrednost rizika,
- $P_f$  - verovatnoća otkaza,
- $C_{PV}$  - novčano izraženi gubici.

Dobijene vrednosti, prema izvoru ekološkog otkaza u odnosu na fizičko (zemlja, vazduh i voda) i prirodno (ljudi, fauna i flora) okruženje, opredeljuju dinamiku preventivnih aktivnosti za obnavljanje elemenata u okviru ekosistema površinske eksploatacije. Maksimalni dopušteni rizik i istovremeno minimalna verovatnoća otkaza elemenata ekosistema zavisi od zahteva zakonske regulative u oblastima zaštite životne sredine u okruženju površinskog kopa.

U Tabeli 4.2.1. su prikazane ključne razlike konvencionalne FMECA i modifikovane V-FMECA metode analize rizika, koje se odnose samo na domen analize rizika.

**Tabela 4.2.1. Ključne razlike konvencionalne FMECA i modifikovane V-FMECA metode procene rizika [113]**

<i>Podela</i>	<i>Konvencionalna FMECA - O, S, D</i>	<i>Modifikovana V-FMECA - <math>T_s, a, t_a, t_p, P_f, C_{PV}</math></i>
<i>Parametar rizika</i>	<i>Stručna intuicija i iskustvo Relativna važnost između O, S i D Relativnost RPN broja Ograničen raspon brojeva za O, S i D Praznine u intervalima raspona RPN broja Ponavljanje RPN brojeva na intervalima Visoka osetljivost RPN broja na male promene parametara uzroka O, S i D</i>	<i>Verovatnoća otkaza (<math>1 - \exp(-a(t_a - t_p))</math>) i NPV analiza ukupnih troškova <math>C_{PV} = C / (1+r)^t_a</math> Nema ograničenja raspona</i>
<i>Mera rizika</i>	<i>Kvalitativna, polu-kvantitativna Subjektivna, ne postoji matematički model rizika Vrednost broj prioriteta relativnog rizika <math>RPN = O * S * D</math></i>	<i>Kvantitativna Definisana matematički model rizika Vrednosni iznos rizika <math>RPV = P_s * C_i</math></i>

Postavljeno je deset procesnih aktivnosti za optimizaciju procene ekoloških rizika održive površinske eksploatacije, modifikovanom kvantitativnom metodom V-FMECA u skladu sa modelom ISO 31000:2018, za svaki od  $N_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) potencijalnih međusobno nezavisnih uzroka otkaza [114]:

- 1) Identifikacija potencijalnih pojedinačnih uzroka otkaza ekosistema i scenarija otkaza.
- 2) Opcija 1: Određivanje verovatnoće pojave ekološkog otkaza bez otkrivanja i preventivnih aktivnosti ( $P_f$ ).
- 3) Opcija 2: Određivanje verovatnoće pojave ekološkog otkaza sa izvršenim preventivnim aktivnostima ( $P_{fp}$ ) sa i bez otkrivanja.
- 4) Opcija 3: Određivanje verovatnoće pojave ekološkog otkaza sa otkrivanjem pojave mogućeg otkaza i odgovarajućim preventivnim aktivnostima ( $P_{f3i}$ ).
- 5) Određivanje ukupnih posledica (troškova) otkaza od svakog uzroka ( $C_i$ ).
- 6) Ocena rizika.
- 7) Utvrđivanje maksimalno prihvatljivog rizika ( $RPV_{imax}$ ).
- 8) Proračun rizika svakog pojedinačnog otkaza po uzrocima ( $RPV_i$ ).
- 9) Poređenje procenjenih rizika za otklanjanje ili umanjenje utvrđenog rizika sa usvojenim prihvatljivim kriterijumima.
- 10) Iterativno rangiranje rizika na osnovu veličine prioritete vrednosti rizika.
- 11) Realizacija planiranih analiziranih aktivnosti, praćenje, kontrola, izveštavanje i završetak projekta.

#### 4.2.1. Procena verovatnoće otkaza ekosistema površinske eksploatacije

U Bajesovskom probablističkom okviru za predstavljanje epistemičke neizvesnosti, verovatnoća se shvata kao subjektivna mera neizvesnosti, odnosno odraz stepena verovanja analitičara, koji se pritom vodi aksiomima verovatnoće. Pod subjektivnom verovatnoćom misli se na zadavanje egzaktne vrednosti verovatnoći [149].

Verovatnoća stabilnog funkcionisanja urbanog rudarskog ekosistema površinske eksploatacije u toku vremena analize, ili do odgovarajućih izvršenih preventivnih aktivnosti sa ili bez otkrivanja uzroka otkaza, može biti definisana različitim zakonima raspodele u skladu sa principima preporučenih metoda pouzdanosti (RCM metode) i Markovljeve analize prema standardu ISO 31010.

Ekosistemi površinske eksploatacije kao i drugi tehnički sistemi moraju pouzdano izvršavati svoju funkciju. Proračuni parametara pouzdanosti rada ili verovatnoće ispravnog funkcionisanja elemenata ekosistema do otkaza se u principu baziraju na utvrđenim srednjim vremenima rada do otkaza i vremenima obnavljanja za sve elemente u ekosistemu eksploatacije. Dobijene verovatnoće bezbednog rada omogućavaju utvrđivanje realnih karakteristika i ekonomskih efekata održivog funkcionisanja ekosistema u celini. Parametri pouzdanosti ekosistema dobijaju se na osnovu analize mogućih stanja vezanih ne samo za vremena ispravnog funkcionisanja i otkaza već i za vremena ekološki dopuštenih stanja, obnavljanja i preventivnih aktivnosti.

Funkcionisanje ekosistema površinske eksploatacije i njegovih elemenata je definisano kao slučajni proces sa eksponencijalno raspodeljenim vremenima realizacija stanja rada i otkaza. Rad do otkaza različitih elemenata ekosistema površinske eksploatacije, kao neprekidna slučajna veličina, može se opisati različitim zakonima raspodele u zavisnosti od osobina sistema i njegovih elemenata, uslova rada, karaktera otkaza, itd. Najjednostavnija i najviše korišćena eksponencijalna raspodela ima sledeću funkciju raspodele vremena funkcionisanja do otkaza elemenata ekosistema:

$$P_s(t_a) = \exp(-a \cdot t_a) \quad (4.2.1.1.)$$

Gde je:

$t_a$  - zadato vreme analize,

$a$  - parametar raspodele (intenzitet otkaza).

Sa druge strane, verovatnoća otkaza u vremenu analize  $t_a$ , prema eksponencijalnom zakonu raspodele, iznosi (Opcija 1):

$$P_f(t_a) = 1 - P_s(t_a) = 1 - \exp(-a \cdot t_a) \quad (4.2.1.2.)$$

Zatim, srednje vreme rada do otkaza elemenata sistema iznosi:

$$t_s = \int P_s(t) dt = \int \exp(-a \cdot t) dt = \frac{1}{a} \quad (4.2.1.3.)$$

Podsistemi i elementi ekosistema mogu biti povezani međusobnim uticajem serijski ili paralelno. Ukoliko se sistem sastoji od  $n_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) serijski povezanih elemenata, verovatnoća rada svakog podsistema ekosistema  $P_{ss}(t_a)$ , za verovatnoće rada svakog elementa  $P_{si}(t_a)$ , iznosi:

$$P_{ss}(t_a) = P_{s1}(t_a) \cdot P_{s2}(t_a) \cdot \dots \cdot P_{sn}(t_a) = \prod_{i=1}^n P_{si}(t_a) \quad (4.2.1.4.)$$

Iz formule 4.2.1.1. i formule 4.2.1.4. vidi se da za eksponencijalnu raspodelu vremena rada  $n$  serijski povezanih elemenata ili podsistema sistema važi sledeće:

$$P_{ss}(t_a) = \prod_{i=1}^n \exp(-a \cdot t_a) \quad (4.2.1.5.)$$

Pa je onda verovatnoća funkcionisanja ekosistema do otkaza:

$$P_{ss}(t_a) = \exp(-a_1 \cdot t_a) \cdot \exp(-a_2 \cdot t_a) \cdot \dots \cdot \exp(-a_n \cdot t_a) = \exp\left(-t_a \cdot \sum_{i=1}^n a_i\right) \quad (4.2.1.6.)$$

Srednje vreme rada tehničkog podsistema je:

$$t_{ss} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (4.2.1.7.)$$

Ako se podsistem sastoji od  $m$  ( $j = 1, \dots, m$ ) paralelno povezanih elemenata ili podsistema, gde je verovatnoća otkaza  $P_{fj}(t) = 1 - P_{sj}(t)$ , onda verovatnoća otkaza ekosistema iznosi:

$$P_{pf}(t_a) = P_{f1}(t_a) \cdot P_{f2}(t_a) \cdot \dots \cdot P_{fm}(t_a) = P_{fj}(t_a) = \prod_{j=1}^m (1 - \exp(-a_j \cdot t_a)) \quad (4.2.1.8.)$$

Kod generalno obnovljivih ekosistema, podsistema ili elemenata, verovatnoća obnavljanja (popravljanja) nakon otkaza ili preventivnih aktivnosti do momenta  $t$ , pri eksponencijalnom zakonu raspodele vremena obnavljanja sa parametrom  $b$  (intenzitet obnavljanja) u vremenu od 0 do  $t$  iznosi:

$$P_r(t_a) = \exp(-b \cdot t_a) \quad (4.2.1.9.)$$

Onda srednje vreme obnavljanja elemenata sistema bude:

$$t_r = \int P_f(t) dt = \int \exp(-b \cdot t) dt = \frac{1}{b} \quad (4.2.1.10.)$$

Intenziteti rada i obnavljanja nakon otkaza svakog obnovljivog ekosistema površinske eksploatacije sa  $n$  redno povezanih elemenata ili podsistema iznose:

$$a = a_1 + a_2 + \dots + a_n$$

$$b = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b_i}} \quad (4.2.1.11.)$$

Gde je:

a - intenzitet otkaza,

b - intenzitet obnavljanja.

Srednje vreme ciklusa funkcionisanja, odnosno obnavljanja ekosistema je:

$$t_c = t_s + t_r = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} + \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b_i}}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad (4.2.1.12.)$$

$$= \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i} \cdot \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b_i} \right)$$

Srednji broj otkaza za vreme  $t_a$  jednako je srednjem broju ciklusa  $m_k$  na tom intervalu:

$$m_k = \frac{t_a \cdot a}{1 + \sum \frac{a_i}{b_i}} \quad (4.2.1.13.)$$

Uopšteno, kada je  $t \rightarrow \infty$ , granične stacionarne verovatnoće funkcionisanja ( $P_s$ ) i obnavljanja redno povezanog ekosistema, podsistema ili elementa površinske eksploatacije nakon otkaza ( $P_f$ ) su:

$$P_s = \frac{b}{a + b} \quad (4.2.1.14.)$$

$$P_f = \frac{a}{a + b}$$

Gde je:

$P_s$  - verovatnoća funkcionisanja,

$P_f$  - verovatnoća obnavljanja nakon otkaza,

$a$  - intenzitet otkaza,

$b$  - intenzitet obnavljanja.

Značajnu ulogu u obezbeđenju ekološke pouzdanosti elemenata, podsistema ili sistema površinske eksploatacije u planiranom vremenu analize ( $t_a$ ), pre kritičnog događaja otkaza u trenutku  $T_s$ , imaju verovatnoće izvršenja preventivnih aktivnosti ( $t_{pi}$ ) sa ili bez pravovremenog otkrivanja ( $t_{di}$ ), čime se otklone ili smanje rizici od posledica otkaza. Pri tome je u praktičnim ekološkim procesima površinske eksploatacije vreme planirane prevencije ( $t_p$ ) jednako zbiru vremena mogućeg otkrivanja ( $t_d$ ) i vremena odgovarajućih preventivnih aktivnosti ( $T_p$ ) (Slika 4.1.1.).

Ako neprekidna slučajna promenljiva ekološkog otkaza zbog bilo koga uzroka/uticajnog faktora  $n_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), kao događaj  $T_s$  u vremenu  $t_{ai}$ , ima negativnu eksponencijalnu raspodelu sa parametrom  $a_i$ , onda je njena funkcija gustine:

$$f_i(t_{ai}) = a_i \cdot \exp(-a_i \cdot t_{ai}), \quad t_{ai} > 0 \quad (4.2.1.15.)$$

Gde je:

$t_{ai}$  - planirano vreme analize.

Kada je izvesno da se u trenutku uspešnog izvršenja preventivnih aktivnosti u vremenu  $t_{pi}$  nije dogodio otkaz, onda verovatnoća tog događaja iznosi:

$$P_{pi} = 1 - \int_0^{t_{pi}} f(t) dt = \exp(-a_i \cdot t_{pi}) \quad (4.2.1.16.)$$

Gde je:

$P_{pi}$  - verovatnoća bezbednog funkcionisanja

$t_{pi}$  - vreme okončanja preventivnih aktivnosti u vremenu  $t$ .

Takođe, uslovna funkcija gustine  $f_{pi}(t)$  vremena koje je ostalo do vremena analize  $t_a$  je:

$$f_{pi}(t) = \frac{f_i(t_{ai})}{P_{pi}} \quad (4.2.1.17.)$$

Sledi da je:

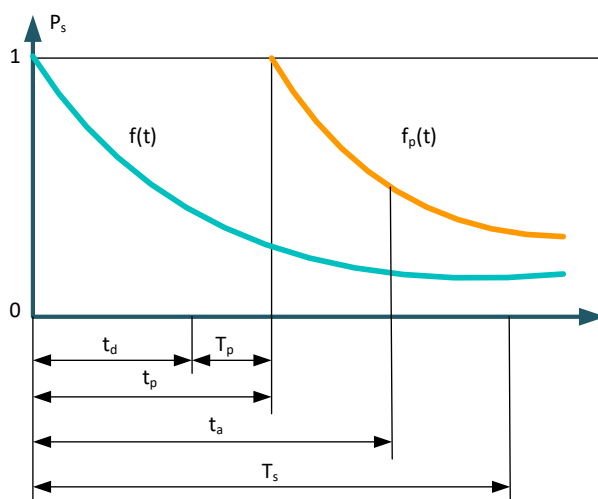
$$f_{pi}(t_{ai}) = \frac{a_i \cdot \exp(-a_i \cdot t_{ai})}{\exp(-a_i \cdot t_{pi})} = a_i \cdot \exp(-a_i \cdot (t_{ai} - t_{pi})), \quad (4.2.1.18.)$$

$$t_{ai} > t_{pi}$$

Verovatnoća uspešne realizacije preventivnih aktivnosti sa i bez otkrivanja, za bilo koji ekološki uticajni uzrok  $n_i$  u datom intervalu vremena  $(t_{ai}-t_{pi})$ , iznosi:

$$P_{pi} = \exp(-a_i \cdot (t_{ai} - t_{pi})) \quad (4.2.1.19.)$$

Vremenski interval  $(t_a-t_{pi})$ , kao slučajna veličina ima istu, ali uslovnu funkciju gustine kao i slučajni događaj otkaza u trenutku  $T_s$  za vreme analize  $t_a > 0$ . Tako, uslovna raspodela vremena ove slučajne veličine koja je preostala do otkaza, ne zavisi od prethodno proteklog vremena  $t_{pi}$ . Ovo je karakteristično za eksponencijalnu raspodelu neprekidne slučajne promenljive, koja ima isključivo svojstvo takozvanog gubitka memorije, odnosno da se verovatnoća ispravnog funkcionisanja ponovo vraća u 1 nakon preventivnih aktivnosti (Slika 4.2.1.1.) [150].



Slika 4.2.1.1. Verovatnoća ispravnog funkcionisanja ekosistema bez i sa preventivnim aktivnostima [150]

Sa ovakvim pristupom postoje praktično tri opcije postavljenog proračuna verovatnoće otkaza elemenata, podsistema ili ekosistema površinske eksploatacije u celini:

- **Opcija 1** - bez otkrivanja mogućeg otkaza i preventivnih aktivnosti ( $P_{f1i}$ ),
- **Opcija 2** - nakon uspešnih preventivnih aktivnosti ( $P_{f2i}$ ) bez otkrivanja bilo kog uzroka otkaza  $n_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) i
- **Opcija 3** - sa otkrivanjem pojave mogućeg otkaza i odgovarajućim preventivnim aktivnostima ( $P_{f3i}$ ).

Može se zaključiti da verovatnoća otkaza ekosistema, podsistema ili elemenata ekosistema površinske eksploatacije  $P_{fs}$ , kada nema mogućnosti otkrivanja uzroka otkaza, niti planiranih preventivnih aktivnosti ( $t_{pi} = 0$ ) za Opciju 1 (Slika 4.2.1.1.), bude:

$$P_{fi} = 1 - \exp(-a_i \cdot t_{ai}) \quad (4.2.1.20.)$$

Kada su uspešno izvršene preventivne aktivnosti u vremenu  $t_{pi}$  sa ili bez otkrivanja ( $t_d = 0$ ), a u zavisnosti od usvojenog prihvatljivog rizika, verovatnoća otkaza za Opciju 2 iznosi:

$$P_{fi} = 1 - \exp(-a_i \cdot (t_{ai} - t_{pi})) \quad (4.2.1.21.)$$

Gde je:

$t_{ai}$  - vreme analize u vremenu  $t$  ( $t_{ai} \geq 0$ ),

$t_{di}$  - vreme otkrivanja u vremenu  $t$  ( $t_{di} < t_{ai}$ ),

$t_{pi}$  - vreme do okončanja preventivnih aktivnosti u vremenu  $t$ .

Ukoliko postoji mogućnost otkrivanja naznaka budućeg otkaza u vremenu  $t_d$ , onda se u Opciji 3 verovatnoća otkaza računa kao:

$$P_{f3i} = 1 - \exp\left(-a_i \cdot \left(t_{ai} - (t_d + T_{pi})\right)\right) \quad (4.2.1.22.)$$

Za  $t_{ai} \geq t_d + T_{pi}$ .

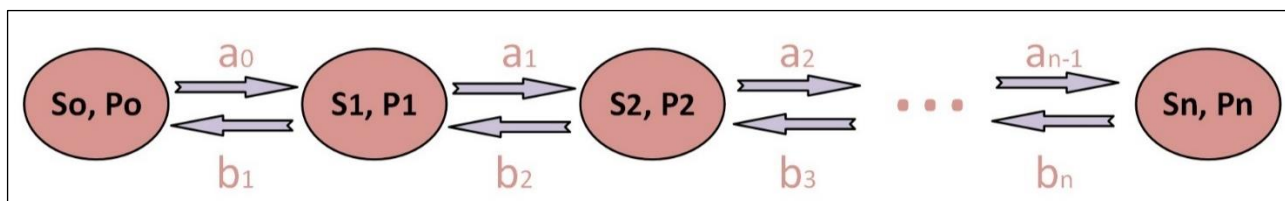
Gde je:

$t_{di}$  - vreme otkrivanja u vremenu  $t$ .

Bez mogućnosti aktivnosti otkrivanja ( $t_d = 0$ ), svakako sledi i odgovarajuća prevencija u vremenu  $T_{pi}$ , kada je  $t_{di} + T_{pi} = t_{pi}$  (Slika 4.2.1.1.), tako da se formula 4.2.1.22. praktično svodi na formulu 4.2.1.21. ( $T_{pi} = t_{pi}$ ) sa prelazom u Opciju 2.

Ugroženost se kontroliše monitoringom sa otkrivanjem i umanjuje pravovremenom planiranom realizacijom prevencije u vremenu  $t_{pi}$  ( $t_{pi} > 0$ ). Na ovaj održivi način se postiže kontinualno praćenje i značajno smanjenje verovatnoće otkaza, opasnosti i posledica kod procena direktnih ekoloških rizika.

Praćenje ovako višefazno postavljenog procesa funkcionisanja ekosistema po stanjima je složen zadatak. Standardom ISO 31010 preporučene su i diskretne slučajne strukturne šeme koje omogućavaju pojednostavljene praktične proračune verovatnoća. Na osnovu ovog pristupa, mnogi problemi vezani za proračune verovatnoće ispravnog funkcionisanja ili pouzdanosti i otkaza ekosistema za veći broj stanja se mogu rešavati na bazi teorije masovnog opsluživanja, kao Markovljeva analiza, prema jednostavnoj šemi rada i otkaza datoj na Slici 4.2.1.2. Šeme predstavljaju grafički prikaz promene stanja elemenata  $S$  u ekosistemu ( $S_i, i = 1, \dots, n$ ) i jednoznačno se mogu definisati, kao primer, ispravnim funkcionisanjem ekosistema ( $S_0$ ), koje obuhvata dopušteno stanje ( $S_1$ ) i stanje pri otkazu ekosistema ( $S_2$ ). Pri tome je zbir svih verovatnoća stanja u analizi jednak jedinici ( $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ ). Intenziteti prelaza iz datog stanja  $S_i$  u naredno stanje označeni su sa  $a_i$ , a iz datog stanja  $S_i$  u prethodno stanje sa  $b_i$ .



Slika 4.2.1.2. Lanac stanja fazne realizacije projekta

Prema lancu stanja datom na Slici 4.2.1.2., granične verovatnoće svih mogućih stanja od 0 do  $n$  dobijaju se iz sledećih formula:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{a_0}{b_1} + \frac{a_0 a_1}{b_1 b_2} + \dots + \frac{a_0 a_1 \dots a_{n-1}}{b_1 b_2 \dots b_n}} \quad (4.2.1.23.)$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n \frac{\prod_{j=0}^{k-1} a_j}{\prod_{j=1}^k b_j}}$$

A onda je:

$$\begin{aligned}
P_1 &= \frac{a_0}{b_1} \cdot P_0 \\
P_2 &= \frac{a_0 a_1}{b_1 b_2} \cdot P_0 \\
&\vdots \\
P_n &= \frac{a_0 a_1 \cdots a_{n-1}}{b_1 b_2 \cdots b_n} \cdot P_0
\end{aligned}
\tag{4.2.1.24.}$$

#### 4.2.2. Procena očekivanih posledica otkaza ekosistema površinske eksploatacije

Ukupni očekivani troškovi posledica otkaza  $i$ -tog elemenata ekosistema površinske eksploatacije  $C_i$  predstavljaju sumu troškova posledica svih  $m$  uzroka ( $j = 1, \dots, m$ ) i iznose:  $C_{ij} = C_{pi1} + C_{oi2} + C_{ui3} + C_{li4} + C_{zi5} + C_{ei6} + \dots + C_{im}$ , (Euro), gde su navedene neke od posledica izraženih preko troškova [139]:

- $C_p$  - pripremni organizacioni troškovi obnavljanja nakon otkaza,
- $C_o$  - operativni direktni troškovi uklanjanja svih posledica,
- $C_u$  - obnavljanje opreme i uređaja,
- $C_l$  - mogući troškovi gubitaka u proizvodnji,
- $C_z$  - mogući zdravstveni troškovi,
- $C_e$  - zakonske kazne zbog otkaza ekosistema.

Troškovi posledica otkaza ekosistema su promenljivi tokom vremena, tako da je i taj finansijski faktor bitan za procenu rizika. Zbog toga je pogodno koristiti sadašnju vrednost (engl. *Present Value - PV*) troškova u obračunu ukupnih troškova posledica po svakom elementu i uzroku ( $C_{ij}$ ) tokom vremena od  $k$  godina sa procenjenom diskontnom stopom (povraćaja) ( $r$ ), korišćenjem dobro poznatog izraza, kada su troškovi posledica otkaza svakog elementa ekosistema [139]:

$$C_{PV_{ij}} = \frac{C_{ij}}{(1+r)^k} \tag{4.2.2.1.}$$

Ukupni očekivani troškovi posledica otkaza ekosistema površinske eksploatacije predstavljaju zbir troškova posledica otkaza svih elemenata u analiziranom vremenu i iznose:

$$C_{PV} = \sum_{i=1}^n C_{PV_i} \tag{4.2.2.2.}$$

#### 4.2.3. Dopušteni ekološki rizik površinske eksploatacije

Analiza posledica otkaza svakog elementa ekosistema površinske eksploatacije sa dopuštenim rizikom radi se za obe opcije procene verovatnoće otkaza opisanih u potpoglavlju 4.2.1. Dopuštena maksimalna verovatnoća otkaza svakog elementa ekosistema ( $P_{fmax}$ ) u skladu sa zakonskom regulativom, istovremeno ukazuje i na maksimalni dopušteni iznos rizika ( $RPV_{max}$ ). Tako je moguće izvršiti procenu dopuštene verovatnoće otkaza, na osnovu opšteprihvaćene formule za procenu rizika 4.2.1., preko izraza [137][139]:

$$P_f \leq P_{fmax} = \frac{RPV_{max}}{C_{PV}} \tag{4.2.3.1.}$$

Dopuštena verovatnoća otkaza istovremeno predstavlja i udeo kompanijski projektno obuhvaćenog dopuštenog novčanog iznosa rizika u odnosu na troškove posledica. Slobodna kompanijska vrednosna procena ovog podataka se nažalost može zloupotrebiti sa ekološkog aspekta u zavisnosti od preciznosti zakonske regulative i njenog sprovođenja [139].

Imajući u vidu značaj zaštite životne sredine u bilo kojoj opciji analize, planski se vrše obavezne tekuće preventivne aktivnosti za smanjenje opasnosti u toku rada površinskog kopa, pri čemu njihova učestalost povećava pouzdanost elemenata ekosistema. Zbog toga je veoma značajno utvrditi maksimalno vreme završetka preventivnih aktivnosti, da bi se realizovala dopuštena vrednost

verovatnoće otkaza elemenata ekosistema površinske eksploatacije u skladu sa zakonski propisanim vrednostima za dopuštenu opasnost kod direktnih uticaja na životnu sredinu. Prema formuli 4.2.1.21. za drugu opciju, maksimalna dopuštena verovatnoća otkaza ( $P_{fmax}$ ) je direktno zavisna od maksimalnog dopuštenog vremena planiranog za realizaciju preventivnih aktivnosti ( $t_{pmax}$ ). Ukoliko je utvrđena maksimalna dopuštena verovatnoća otkaza, odnosno, minimalna pouzdanost  $i$ -tog elemenata kao izvora opasnosti za otkaz ekosistema (objekat, oprema, tehnologija itd.), granično ili maksimalno vreme završetka preventivne aktivnosti iznosi [139]:

$$t_{pmaxi} = \frac{-\ln(1 - P_{fmaxi})}{\alpha_i} \quad (4.2.3.2.)$$

Ovaj pristup dovodi do mogućnosti realizacije procene vremena završetka preventivnih aktivnosti sa zadatom dopuštenom verovatnoćom otkaza ekosistema površinske eksploatacije. Na taj način se olakšava upravljanje ekosistemom sa smanjenjem ekoloških rizika od otkaza zbog bilo kog uzroka i mogućih troškova posledica do minimalnih vrednosti.

## 5. ANALIZA SPECIFIČNIH SLUČAJEVA I VERIFIKACIJA MODELA

Efikasno upravljanje ekološkim rizicima je ključno za važan balans između očuvanja životne sredine i održive eksploatacije ležišta mineralnih sirovina. Ovo poglavlje prikazuje par studija slučaja predviđenih da verifikuju sveobuhvatan model upravljanja ekološkim rizicima. Kroz preciznu analizu i empirijsku validaciju, ove studije slučaja uspostavljaju strukturirani pristup koji ne samo da identifikuje potencijalne rizike već i na taj način ukazuje na proaktivne mere za ublažavanje ovih pretnji. Oslanjajući se na različite ekološke kontekste, ovde predstavljene studije slučaja prikazuju prilagodljivost i efikasnost predloženog modela u različitim situacijama na površinskim kopovima i ekološkim izazovima, usklađenog sa ISO 31000, korišćenjem metoda FMECA i RCM kao najprihvatljivijih alata za procenu rizika (Tabela 3.1.1.).

Uspostavljanjem teoretskih uvida sa primenama u stvarnom svetu, ovo poglavlje povezuje teorijski postavljen model i praktičnu primenu, nudeći neprocenjiv uvid u složenost modernog upravljanja životnom sredinom.

Primenom modela u scenarijima iz stvarnog sveta, ove studije slučaja pokazuju njegovu fleksibilnost, praktičnost i delotvornost u vođenju strategija identifikacije rizika i reagovanja. Svaki slučaj naglašava kako okvir podržava informisano donošenje odluka i promoviše ekološku otpornost. Zajedno, ovi primeri naglašavaju vrednost modela kao alata za integraciju nauke u praksu, nudeći lako primenljiv pristup za održivo upravljanje ekološkim rizicima, i samim tim životnom sredinom i površinskim kopom.

### 5.1. Procena rizika poplavljene opreme na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje

Tamnava-Zapadno polje je površinski kop uglja koji ostvaruje najveću proizvodnju uglja u Republici Srbiji. Sudeći prema dostupnim informacijama o proizvodnji uglja, površinski kop Tamnava-Zapadno polje je neophodan za proizvodnju električne energije u najvažnijoj termoelektrani u Republici Srbiji i ukupnu energetska stabilnost u državi.

Nepovoljan događaj u obliku obilnih padavina je izazvao nezapamćene poplave 2014. godine (Slika 5.1.1.). Svi površinski kopovi uglja u državi su bili poplavljani, zajedno sa opremom za kontinualnu eksploataciju. Da bi se krizna situacija rešila u što bržem roku, formiran je stručni tim za razvijanje plana sanacije površinskih kopova radi minimiziranja negativnih posledica poplava. Iznenadna primena plana sanacije površinskog kopa Tamnava-Zapadno polje ukazala je na potrebu za proverom donetih odluka i uspostavljanjem metodološkog pristupa za procenu rizika revitalizacije opreme za kontinualan rad za proizvodnju u sve složenijim unutrašnjim i spoljašnjim rudarskim uslovima, u skladu sa razvijenom V-FMECA metodom. Detaljna analiza opcija revitalizacije treba da se sprovede imajući u vidu potencijalne gubitke gubitaka, što uključuje određivanje verovatnoće i vremena otkaza. U smislu vrste rizika, poplava ovih razmera treba da se smatra nekontrolisanim ekološkim rizikom.

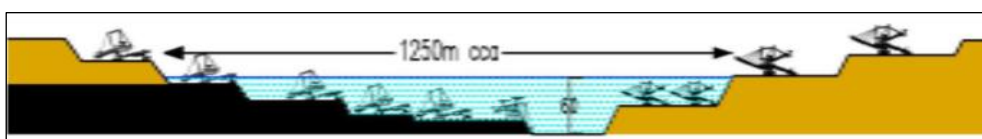


Slika 5.1.1. Poplavljen površinski kop Tamnava-Zapadno polje [144]

### 5.1.1. Identifikacija rizika potopljene opreme na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje

Problem potopljene rudarske opreme ne treba analizirati samo sa ekonomske strane revitalizacije opreme, zbog kompleksnosti problema. Pristup ovom izazovu treba da bude multidisciplinarnan jer je neophodno uzeti u obzir niz faktora za konačan izbor investicionih opcija za revitalizaciju rudarske opreme. Nakon ove katastrofe, na Tamnava-Zapadnom polju je poplavljeno pet kontinualnih rudarskih sistema: sistemi za jalovinu, ugalj i međuslojnu jalovinu (Slika 5.1.1.1.). Ti poplavljene kontinualni sistemi su obuhvatali sledeću osnovnu opremu: četiri rotorna bagera, jednog bagera vedričara, pet odlagača i mnogo linija transportera. Pored toga, poplavljena je i sledeća pomoćna oprema: četiri dreglajna, buldozer, sedam cevopolagača, šest hidrauličnih bagera i dve dizalice. Vrednost poplavljene opreme 2014. godine, ako bi bila nabavljena kao nova, tada bi iznosila približno 250 miliona eura [125]. Pošto bi 250 miliona eura odjednom bila nemoguća investicija, zaključeno je da je revitalizacija opreme najbolje rešenje [144].

Plan revitalizacije opreme nakon katastrofalnih poplava površinskih kopova uglja u Republici Srbiji imao je tri moguće opcije ulaganja, koje su detaljno razmatrane.



Slika 5.1.1.1. Potopljeni bageri na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje [144]

Diskusije i analize stručnog tima su bile fokusirane na tri nivoa radova na popravkama i revitalizaciji opreme za kontinualan rad prema sledećim kriterijumima [125][144]:

- **Opcija 1:** Minimalna investicija i minimalno vreme za dovođenje rudarske opreme u radno stanje; ovo podrazumeva aktivnosti kao što su demontaža samo poplavljene osnovne opreme, pranje i čišćenje, neophodna zamena kritičnih delova, servis svih delova, montaža testirane i očišćene opreme, kao i funkcionalna ispitivanja.
- **Opcija 2:** Investicije koje će eliminisati sve negativne efekte poplavljene osnovne i pomoćne rudarske opreme; ovo podrazumeva aktivnosti kao što su kompletna rekonstrukcija/zamena poplavljenih segmenata, servis ostalih delova, montaža popravljene i nove opreme, kao i funkcionalna ispitivanja.
- **Opcija 3:** Investicije koje uključuju kompletnu rekonstrukciju i modernizaciju rudarske opreme, sa funkcionalnim ispitivanjima nakon montaže.

Svaka opcija je detaljno analizirana za svu opremu. U svim slučajevima, investicije u električne delove su iste. Nakon pažljivog razmatranja, popravke su primenjene prema opciji 2. Procena cele opreme je izvršena na osnovu stanja opreme - određeni bageri su bili potpuno poplavljene, neki su bili delimično poplavljene, stoga nisu svi delovi morali biti zamenjeni ili popravljani (Slika 5.1.1.2.).



*Slika 5.1.1.2. Delimično potopljen rotorni bager na otkopavanju otkrivke [144]*

Još jedan bitan faktor pri opredeljivanju za rešenje je bila mogućnost pronalaženja određenih delova opreme na tržištu, jer je nabavka delova za veliku rudarsku opremu složena i zahteva dosta vremena. Procenjena vrednost oštećene električne opreme bila je 28,6 miliona eura, dok su stvarni troškovi iznosili 28,4 miliona eura. Sličan odnos procenjene i stvarne štete bio je i na mašinskoj opremi, a iznosio je 17,5 miliona eura [144].

Modernizovana oprema takođe može imati iznenadne kvarove iz više razloga, što predstavlja tehnički rizik. Kao što je ranije objašnjeno, tehnički rizik je mogući negativan uticaj koji promene mogu imati na projekat, sistem ili celu infrastrukturu kada implementacija nečega unutar njega ne funkcioniše kako je predviđeno [151]. To su rizici uzrokovani upotrebom novih ili neproverenih tehnologija ili tehničke opreme ili sredstava proizvodnje [46].

Još jedna stvar koju treba uzeti u obzir pri proceni rizika jeste da bi se događaj ovih razmera mogao ponoviti ranije nego što je to očekivano i obično predviđano. Zbog toga, taj rizik treba razmatrati zajedno sa prethodno pomenutim tehničkim rizikom u serijskoj vezi.

Rizici u vezi sa troškovima sve više zahtevaju posebnu pažnju. Rizici se mogu podeliti na kontrolisane rizike, koji su predvidljivi i mogu imati kratkoročnu planiranu kontrolu u području površinskog kopa, i nekontrolisane rizike, koji su povezani sa spoljnim uticajima čija se pojava ne može predvideti kratkoročno i po pravilu se odnose na konturu kopa. Nekontrolisani rizici, koji su posebno povezani sa ekološkim opasnostima kao u ovom slučaju, mogu imati katastrofalne posledice po rudarstvo i dovesti do dužeg obustavljanja rada, kao i potpunog zatvaranja površinskog kopa sa velikim gubicima [124].

Smanjenje verovatnoće otkaza je najefikasniji način upravljanja rizicima, a ne analiziranje i naknadno otklanjanje posledica neželjenih događaja nakon što su se oni već desili. Rizik je u suštini nepouzdanost, a njegova vrednost je verovatnoća dopunjavanja pouzdanosti do vrednosti jedan [124].

Ukupni rizici se u ovom primeru dele na tehničke, ekološke kontrolisane (kojima se može upravljati blagovremenim i pažljivim radom i planom održavanja, operativnim merama i investicijama) i nekontrolisane ekološke rizike povezane sa ekološkim katastrofama kao što su poplave. U ovom slučaju, tehnički rizici i ekološki kontrolisani rizici su pod uticajem nekontrolisanog ekološkog rizika. Ukupni procenjeni rizik se proverava poređenjem kriterijuma podobnosti za elemente podsistema, kao što su minimalno dozvoljene vrednosti pouzdanosti, rizika od otkaza i sadašnje vrednosti gubitaka [144].

### **5.1.2. Verovatnoće rizika**

Za međusobno isključive pojedinačne događaje tehničkih i ekoloških otkaza, odgovarajuće rizike treba proceniti i dodati do ukupnog totalnog rizika [112][137]. Prema klasičnoj definiciji, rizik od tehničkog i ekološkog otkaza je praktično mogućnost nastanka situacije ili događaja koji može imati negativne posledice na funkciju i rad površinskog kopa, a prikazuje se kao se kao formula 4.2.1.:

$$R = P_f \cdot C_{PV}$$

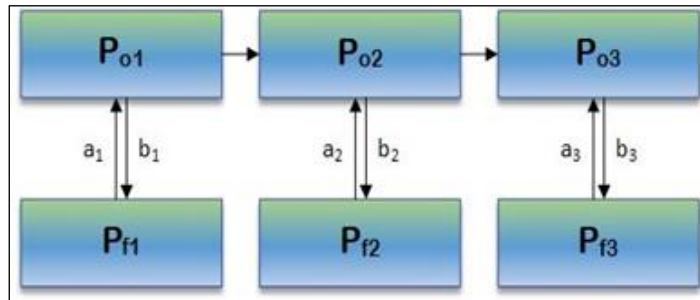
Gde je:

$P_f$  - verovatnoća bilo kakvog otkaza (verovatnoća prekoračenja)

i  $C_{PV}$  - gubici uzrokovani otkazom.

Ukupni gubici usled otkaza na površinskim kopovima se obično izražavaju u novčanim jedinicama.

Bilo koji pojedinačni rizik od otkaza (Slika 5.1.2.1.) može biti prihvatljiv, dok bi ukupni (agregatni) rizik mogao biti neprihvatljiv. Postavljena šema na Slici 5.1.2.1. je u skladu sa Markovljevom analizom, koja je preporučeni za procenu verovatnoće otkaza složenih ekosistema prema standardu ISO 31010.



Slika 5.1.2.1. Verovatnoće rada i otkaza tehničkih ( $P_{o1}, P_{f1}$ ), kontrolisanih ( $P_{o2}, P_{f2}$ ) i nekontrolisanih ( $P_{o3}, P_{f3}$ ) elemenata životne sredine u serijskoj sistemske vezi [144]

Srednje vreme rada do otkaza elemenata sistema ( $i = 1, \dots, n$ ) je [152][153] po formuli 4.2.1.3.:

$$t_s = \int P_s(t) dt = \int \exp(-a \cdot t) dt = \frac{1}{a}$$

Srednje vreme obnavljanja elemenata sistema je prema formuli 4.2.1.10.:

$$t_r = \int P_f(t) dt = \int \exp(-b \cdot t) dt = \frac{1}{b}$$

Vrednosti  $a_i$  i  $b_i$  (formula 4.2.1.14.) su dobijene iz prosečnih vremena otkaza i obnove bagera za kontinualni rad pre i posle poplave. Podaci pre poplave bi ostali identični za Opciju 1 jer u tom slučaju bageri ne bi bili modernizovani. Podaci posle poplave se zasnivaju na trenutnom radnom stanju bagera, s obzirom na to da je izabrana Opcija 2, što omogućava korišćenje realnih podataka. Očigledno je da modernizovani bageri Opcije 2 imaju niže prosečno vreme otkaza u poređenju sa bagerima pre revitalizacije. U tom kontekstu, Opcija 3 bi onda imala još optimističnije radne rezultate [144].

Kada je  $t \rightarrow \infty$ , ograničene verovatnoće stacionarnog rada elemenata ( $P_{oi}$ ) i verovatnoće obnove elemenata nakon otkaza ( $P_{fi}$ ) serijskog tehničkog i ekološkog rudarskog podsistema su po formuli 4.2.1.14.:

$$P_o = \frac{b_i}{a_i + b_i}$$

$$P_f = \frac{a_i}{a_i + b_i}$$

Sistemi proizvodnje na površinskim kopovima po pravilu imaju izuzetno visoke gubitke usled otkaza elemenata. Uobičajeno je da se gubici usled različitih otkaza procenjuju kroz raspoloživost (odnos ostvarene i najveće moguće proizvodnje) [154]. Međutim, kada se uzme u obzir da se otkazi dešavaju u različito vreme, finansijski uticaj na gubitke u proizvodnji i troškovi obnove elemenata sistema su važni, pa je korisno koristiti sadašnju vrednost ukupnih gubitaka u datom trenutku  $t$  u procenama rizika, preko poznate formule 4.2.2.1. sadašnje vrednosti [144].

Verovatnoća  $P_{si}$  da se katastrofalni događaj neće dogoditi tokom analiziranog perioda projekta od  $n$  godina je prikazana formulom 4.2.1.1. za eksponencijalnu raspodelu slučajne promenljive:

$$P_{si} = \exp(-a \cdot t_a)$$

S druge strane, zakonski predviđeni povratni period takvih ekstremnih padavina je 100 godina, pa je  $1/a = 0,01$ . Odavde je jasno da je  $n = 10$  godina jer je po formuli 4.2.1.1.:

$$P_{s10} = \exp(-0,01 \cdot 10) = 0,9$$

Verovatnoća da će se događaj otkaza dogoditi u ovom periodu je 10%, odnosno, verovatnoća da će se katastrofalni događaj desiti barem jednom tokom analiziranog perioda projekta je:

$$P_{f10} = 1 - P_s = 0,1$$

Strukturne šeme koje predstavljaju grafički prikaz elemenata u sistemu mogu nedvosmisleno definisati rad ili otkaz sistema [155]. Elementi sistema su povezani serijskom vezom. Kao što je ranije navedeno, ako se sistem sastoji od  $n$  elemenata povezanih serijski, verovatnoća rada sistema  $P_{ss}(t)$ , za verovatnoću rada svakog elementa  $P_{si}(t)$ , po formuli 4.2.1.4. iznosi:

$$P_{ss}(t_a) = P_{s1}(t_a) \cdot P_{s2}(t_a) \cdot \dots \cdot P_{sn}(t_a) = \prod_{i=1}^n P_{si}(t_a)$$

Za  $i$  međusobno nezavisnih otkaza u serijskim sistemima, ukupan rizik od otkaza je [124] po formuli 4.2.1.:

$$R_t = P_{f1} \cdot C_1 + \dots + P_{fn} \cdot C_i$$

$$R_t = \sum_{i=1}^n P_{fi} \cdot C_i \quad (5.1.2.2.)$$

Gde je:

- $R_t$  - ukupan rizik od tehničkog i ekološkog otkaza,
- $P_{fi}$  - verovatnoća otkaza  $i$ -tog elementa ( $i = 1, \dots, n$ ),
- $C_i$  - očekivani gubici usled otkaza  $i$ -tog elementa.

### 5.1.3. Investicije u opremu na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje

Procenjene investicije za svaku analiziranu opciju nakon štete od enormne poplave površinskog kopa Tamnava-Zapadno polje su prikazane u Tabeli 5.1.3.1. Ove vrednosti proizašle su iz hitne ekspertske studije o potrebnim popravkama i revitalizaciji opreme nakon poplave, a procenjene su u eurima [€][144].

**Tabela 5.1.3.1. Investicioni troškovi za sve opcije [144]**

Opcije za revitalizaciju opreme	Iznos [€]
Opcija 1	32.360.000
Opcija 2	40.942.000
Opcija 3	46.771.000

Troškovi popravke za svaku mašinu su detaljno procenjeni. Pošto su bageri za kontinualni rad, odlagači i transporter najskuplja i ujedno najvažnija osnovna rudarska oprema, oni su prikazani izdvojeno u Tabeli 5.1.3.2.

**Tabela 5.1.3.2. Iznosi investicija za osnovnu opremu [144]**

<i>Oprema</i>	<i>Opcija 1 [€]</i>	<i>Opcija 2 [€]</i>	<i>Opcija 3 [€]</i>
<i>SchRs 1600</i>	2.178.500	2.413.500	3.413.500
<i>SchRs 630 G1</i>	2.361.000	2.995.000	3.995.000
<i>SchRs 630 G4</i>	2.361.000	2.995.000	3.995.000
<i>SchRs 900</i>	2.461.000	3.095.000	6.427.000
<i>ERs 1000</i>	2.126.000	2.673.000	6.454.000
<i>Odlagači (četiri)</i>	5.143.050	5.691.150	5.721.000
<i>Transporteri</i>	15.730.000	16.960.000	16.766.000

Kao što je prikazano u Tabeli 5.1.3.2., novčani iznosi potrebni za revitalizaciju osnovne opreme na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje su značajni. Visina ulaganja u revitalizaciju bagera jasno ukazuje na potrebu za detaljnom analizom rizika, sa uzimanjem u obzir nepovoljnog događaja velikih padavina. Drugi ključni parametri za procenu verovatnoće su intenziteti otkaza i obnove. Tabela 5.1.3.3. prikazuje trajanje revitalizacije opreme za svaku opciju i mašinu, što je od suštinskog značaja za određivanje gubitaka u proizvodnji dok bageri ne postanu operativni. S obzirom na neophodno vreme za revitalizaciju određenih mašina (prikazano podebljano u tabeli 5.1.3.3.), to mora biti minimalno vreme revitalizacije ukupno za svaku opciju u celini [144].

**Tabela 5.1.3.3. Vreme potrebno za revitalizaciju opreme [144]**

<b>Oprema</b>	<b>Opcija 1 [dana]</b>	<b>Opcija 2 [dana]</b>	<b>Opcija 3 [dana]</b>
<i>SchRs 1600</i>	60	60	60
<i>SchRs 630 G1</i>	<b>90</b>	<b>90</b>	90
<i>SchRs 630 G4</i>	<b>90</b>	<b>90</b>	90
<i>SchRs 900</i>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>180</b>
<i>ERs 1000</i>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>180</b>
<i>Odlagači</i>	60	60	60
<i>Transporteri</i>	60	60	60
<i>Ukupno neophodno vreme</i>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>180</b>

Pored vremena potrebnog za kontinuiranu revitalizaciju opreme, u analizu treba uključiti i vreme potrebno za sanaciju rudnika. Prosečno vreme odvodnjavanja poplavljenog rudnika za svaki nivo bagera je 3 meseca, jer je pre svega površinski kop morao biti odvodnjen da bi se bageri oslobodili i da bi im se moglo pristupiti. To vreme se mora dodati vremenu trajanja revitalizacije opreme zbog uzimanja nekontrolisanog rizika u obzir.

Tabela 5.1.3.1. prikazuje ukupne investicione troškove tri moguće opcije revitalizacije opreme. Međutim, investicioni troškovi nisu jedini faktori koje treba razmotriti. Zaustavljanje proizvodnje zbog poplave takođe je prouzrokovalo ogromne gubitke. Sanacija rudnika je trajala 6 meseci, a za to vreme gubitak proizvodnje je iznosio 15 miliona eura, što je 2,5 miliona eura gubitaka mesečno, odnosno 500.000 eura po bageru mesečno [124]. Taj gubitak se takođe mora dodati nekontrolisanom riziku, pored troškova popravke mehanizacije iz Tabele 5.1.3.1.

Dalje, gubitak zbog zastoja mora se uzeti u obzir kod tehničkih rizika, jer svaki otkaz dovodi do zaustavljanja kontinualnog sistema. Kada bager nije u upotrebi mesec dana, on stvara gubitak u proizvodnji od 500.000 eura. Čak i ako maksimalno vreme popravke (obnove) traje pola meseca, kada se na to dodaju troškovi popravke, ukupni gubitak iznosi 1.000.000 eura [144].

#### 5.1.4. Kvantitativna analiza rizika poplavljenog kopa

Kvantitativna analiza verovatnoće između različitih opcija pruža precizne i realne rezultate, kako za verovatnoće neuspeha usled rizika, tako i za gubitke u zavisnosti od trenutka investiranja na osnovu neto sadašnje vrednosti (NSV), u skladu sa V-FMECA metodološkim pristupom.

U tabelama 5.1.4.1., 5.1.4.2. i 5.1.4.3 su prikazani parametri procene verovatnoća za Opciju 1, Opciju 2 i Opciju 3.

**Tabela 5.1.4.1. Parametri i analiza tehničkih i ekoloških rizika za Opciju 1 [144]**

Parametar	Tehnički	Ekološki kontrolisan	Ekološki nekontrolisan
Intenzitet otkaza (godina <sup>-1</sup> ) (formula 4.2.1.3.), <i>a</i>	2,44	3	0,10
Intenzitet obnavljanja (god <sup>-1</sup> ) (formula 4.2.1.10.), <i>b</i>	5	25	2
Verovatnoća uspešne revitalizacije u zadatom vremenu (formula 4.2.1.14.), <i>P<sub>s</sub></i>	0,67	0,89	0,95
Verovatnoća neuspešne revitalizacije u zadatom vremenu (formula 4.2.1.14.), <i>P<sub>f</sub></i>	0,33	0,11	0,05
Gubici (miliona eura), <i>C</i>	11,6	11,25	47,36
Rizik (formula 4.2.1.), <i>R<sub>tO1</sub></i>	3,8	1,21	2,26

Kao rezultat analiziranih parametara, ukupan rizik od otkaza prema formuli 5.1.2.2. jednak je:

$$R_{tO1} = P_{f1} \cdot C_1 + P_{f2} \cdot C_2 + P_{f3} \cdot C_3 = 0,33 \cdot 11,6 + 0,11 \cdot 11,25 + 0,05 \cdot 47,36 = 7,26$$

Sadašnja vrednost ukupnih gubitaka prema formuli 4.2.2.1. u planiranom vremenu prekoračenja  $t = 10$  godina u procenama rizika, gde je diskontna stopa 8%, je jednaka:

$$C_{PV_{O1}} = \frac{C_{O1}}{(1+r)^k} = \frac{70,21}{1,08^{10}} = 32,52$$

**Tabela 5.1.4.2. Parametri i analiza tehničkih i ekoloških rizika za Opciju 2 [144]**

Parametar	Tehnički	Ekološki kontrolisan	Ekološki nekontrolisan
Intenzitet otkaza (godina <sup>-1</sup> ) (formula 4.2.1.3.), <i>a</i>	1,7	2,38	0,10
Intenzitet obnavljanja (god <sup>-1</sup> ) (formula 4.2.1.10.), <i>b</i>	10	25	2
Verovatnoća uspešne revitalizacije u zadatom vremenu (formula 4.2.1.14.), <i>P<sub>s</sub></i>	0,82	0,91	0,95
Verovatnoća neuspešne revitalizacije u zadatom vremenu (formula 4.2.1.14.), <i>P<sub>f</sub></i>	0,18	0,09	0,05
Gubici (miliona eura), <i>C</i>	7,5	7,5	55,94
Rizik (formula 4.2.1.), <i>R<sub>tO2</sub></i>	1,31	0,65	2,66

Za Opciju 2, ukupna verovatnoća uspešne revitalizacije u zadatom vremenu serijski povezanog sistema ( $P_{os}$ ) po formuli 4.2.1.4. je 0,74, verovatnoća neuspešne revitalizacije u zadatom vremenu sistema ( $P_{fs}$ ) po formuli 5.1.2.1. je 0,26, a ukupni gubici su  $C_{O2} = 70,94$  miliona eura.

Kao rezultat toga, ukupni rizik od otkaza prema formuli 5.1.2.2. jednak je:

$$R_{tO2} = P_{f1} \cdot C_1 + P_{f2} \cdot C_2 + P_{f3} \cdot C_3 = 0,15 \cdot 7,5 + 0,09 \cdot 7,5 + 0,05 \cdot 55,94 = 4,41$$

Sadašnja vrednost ukupnih gubitaka prema formuli 4.2.2.1. u planiranom vremenu prekoračenja  $t = 10$  godina u procenama rizika, sa diskontnom stopom od 8%, je jednaka:

$$C_{PV_{O2}} = \frac{C_{O2}}{(1+r)^k} = \frac{70,94}{1,08^{10}} = 32,86$$

**Tabela 5.1.4.3. Parametri i analiza tehničkih i ekoloških rizika za Opciju 3 [144]**

Parametar	Tehnički	Ekološki kontrolisan	Ekološki nekontrolisan
Intenzitet otkaza (godina <sup>-1</sup> ) (formula 4.2.1.3.), $a$	1,5	2	0,10
Intenzitet obnavljanja (god <sup>-1</sup> ) (formula 4.2.1.10.), $b$	12	25	1,34
Verovatnoća uspešne revitalizacije u zadatom vremenu (formula 4.2.1.14.), $P_s$	0,89	0,93	0,93
Verovatnoća neuspešne revitalizacije u zadatom vremenu (formula 4.2.1.14.), $P_f$	0,11	0,07	0,07
Gubici (miliona eura), $C$	5	6	69,27
Rizik (formula 4.2.1.), $R_{tO3}$	0,56	0,44	4,81

Za Opciju 3, ukupna verovatnoća uspešne revitalizacije u zadatom vremenu serijski povezanog sistema ( $P_{os}$ ) po formuli 4.2.1.4. je 0,77, verovatnoća neuspešne revitalizacije u zadatom vremenu sistema ( $P_{fs}$ ) po formuli 5.1.2.1. je 0,23, a ukupni gubici su  $C_{O2} = 80,27$  miliona eura.

Kao rezultat toga, ukupni rizik od otkaza prema formuli 5.1.2.2. jednak je:

$$R_{tO3} = P_{f1} \cdot C_1 + P_{f2} \cdot C_2 + P_{f3} \cdot C_3 = 0,11 \cdot 5 + 0,07 \cdot 6 + 0,07 \cdot 69,27 = 5,81$$

Sadašnja vrednost ukupnih gubitaka neuspešne revitalizacije u zadatom vremenu  $t = 10$  godina u procenama rizika prema formuli 4.2.2.1., sa diskontnom stopom od 8%, je jednaka:

$$C_{PV_{O3}} = \frac{C_{O3}}{(1+r)^k} = \frac{80,27}{1,08^{10}} = 37,18$$

Sadašnje vrednosti tri opcije revitalizacije mogu se rangirati korišćenjem višekriterijumske analize odlučivanja kako bi se dobio jasniji pregled najpovoljnijih rezultata. TOPSIS bi bio odgovarajuća metoda za ovu analizu odlučivanja [144].

### 5.1.5. Rezultati analize rizika

Tabela 5.1.5.1. prikazuje konačne rezultate kvantitativne analize verovatnoće rizika, sa podebljanim najpovoljnijim rezultatima. Tehnički rizici bi bili znatno smanjeni u Opciji 3 zahvaljujući modernizovanoj opremi. Međutim, veće investicije nose značajan ekonomski rizik, s obzirom na ozbiljnu mogućnost ponavljanja razornog događaja prirodne nepogode.

**Tabela 5.1.5.1. Kvantitativna procena rizika i sadašnja vrednost gubitaka različitih opcija revitalizacije [144]**

Opcija	Rizik	Sadašnja vrednost [€]
<b>Opcija 1</b>	7,26	<b>32,52</b>
<b>Opcija 2</b>	<b>4,41</b>	32,86
<b>Opcija 3</b>	5,81	37,18

Opcija 1 pokazuje najnižu sadašnju vrednost gubitaka, prvenstveno zahvaljujući minimalnim potrebnim investicijama. Međutim, ulaganja predviđena u Opciji 2 dovode do značajnog smanjenja rizika, dostižući najniži i samim tim najpovoljniji nivo. Na osnovu toga, jasno je da je Opcija 2 predstavljala najracionalniju investiciju, jer omogućava otklanjanje svih negativnih posledica poplavljene osnovne i pomoćne rudarske opreme u najkraćem mogućem roku. Izbor stručnog tima u korist ove opcije bio je opravdan, uprkos urgentnosti situacije.

Dobijeni rezultati su rangirani korišćenjem analize odlučivanja sa više kriterijuma (TOPSIS), uzimajući u obzir jednake preferencije vrednosti rizika i sadašnje vrednosti iz kvantitativne analize rizika. Rangiranje je prikazano u tabeli 5.1.5.2.

**Tabela 5.1.5.2. Rangiranje procenjenih opcija po TOPSISu [144]**

<i><b>TOPSIS</b></i>	<i><b>Blizina idealnom rešenju</b></i>	<i><b>Rang</b></i>
<i>Opcija 1</i>	0,22	<b>3</b>
<i>Opcija 2</i>	0,98	<b>1</b>
<i>Opcija 3</i>	0,47	<b>2</b>

TOPSIS analiza potvrđuje da je Opcija 2 najadekvatnije rešenje.

Ovaj model za identifikaciju i upravljanje rizicima preporučuje se zbog serijske međuzavisnosti svih rizika koji mogu ugroziti funkcionalnost sistema, a ne samo jedne izolovane verovatnoće otkaza. Primena ovog modela omogućava objektivno donošenje odluka, uzimajući u obzir neto sadašnju vrednost u realnim uslovima poslovanja, gde se rudarska preduzeća istovremeno suočavaju sa višestrukim rizicima.

Usvojene opcije revitalizacije rudarske opreme hitno su procenjene kako bi se obezbedio nastavak proizvodnje uglja na površinskom kopu Tamnava–Zapadno polje. Takođe, može se konstatovati da su mere sanacije i revitalizacije bile uspešne, s obzirom na to da je kop relativno brzo vraćen u operativno stanje, a proizvodnja uglja dostigla 11.400.000 tona u 2015. godini.

## **5.2. Analiza rizika otkaza generalne kosine na površinskom kopu Polje E**

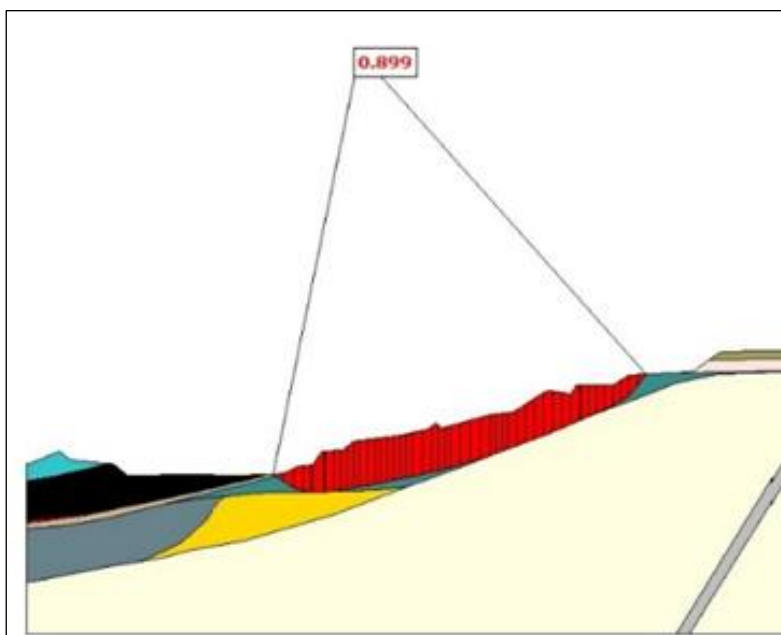
Kako bi se osiguralo buduće sigurno snabdevanje postojećih termoelektrana u Republici Srbiji, otvoren je novi površinski kop uglja Polje E u Kolubarskom basenu uglja. Iako je projektovanje površinskog kopa urađeno u skladu sa važećom zakonskom regulativom u oblasti rudarstva, došlo je do pojave neželjene narušene stabilnosti po kružnoj lomnoj površini generalne kosine (Slika 5.2.1.). Pored velike količine obrušenog materijala otkrivke, gubitaka u proizvodnji uglja i pada u količinama otkopane otkrivke, ugroženi su i objekti radionice za pomoćnu opremu i montažni plac u izgradnji, trafostanica, izmešteno korito reke i puta (Slika 5.2.2.), a došlo je i do oštećenja rotornog bagera i transportera, te tako i ekosistem površinskog kopa u celini [150].



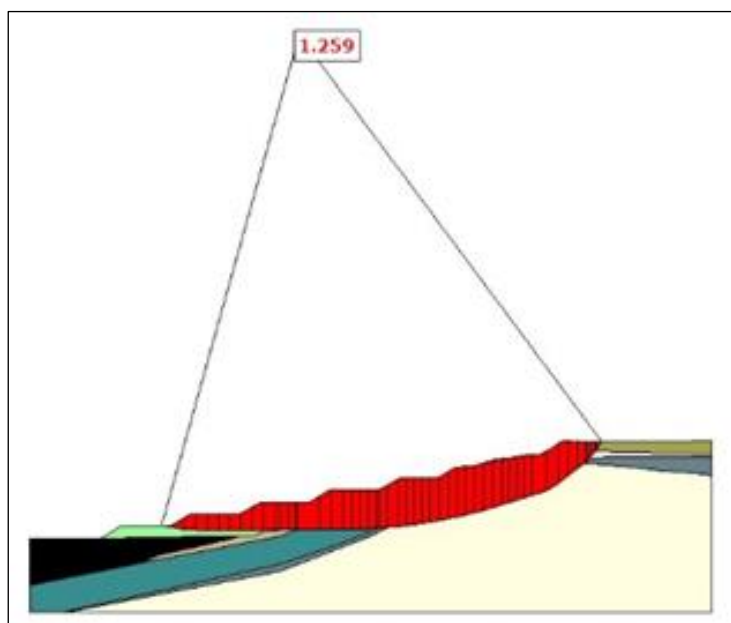
Slika 5.2.1. Rezultat narušene stabilnosti kosine na površinskom kopa Polje E [150]

Otkaz stabilnosti južne generalne kosine površinskog kopa Polje E dogodio se kao posledica niza nepovoljnih okolnosti. Četiri najvažnija uzroka loma kosine su: pouzdanost geoloških parametara kao osnove za proces projektovanja kosina, stepen implementacije planirane tehnologije rudarstva i aktivnosti odvodnjavanja, kao i pojava ekstremnih padavina kao slučajnog procesa (prikazano u svim tabelama ovog potpoglavlja). Svi uzroci su povezani sa odgovarajućim vremenski zavisnim troškovima posledica otkaza [150].

Izvršena naknadna geomehantička analiza za stanje pre otkaza stabilnosti kosine, sa softverskim proračunom faktora sigurnosti, pokazuje veliku nestabilnost ukupnog nagiba jer je  $F_s = 0,9$  (Slika 5.2.2.), čak i uz minimalnu vrednost koeficijenta pornog pritiska  $R_u = 0,2$ . Prema Pravilniku o tehničkim zahtevima za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina (Sl. glasnik RS, br. 96/2010), dozvoljen je faktor sigurnosti od 1,3 do 1,5 za ukupni ugao nagiba površinskog kopa sa proverom stanja svakih šest meseci. Zaključeno je da je za ukupnu stabilizaciju ugla nagiba i saniranje loma kosine i zaštitu objekata infrastrukture površinskog kopa neophodna izrada potpornog nasipa duž ugrožene kosine, kako bi se postigla stabilnost ukupnog nagiba sa faktorom sigurnosti od 1,3, sa uglom nagiba od  $9^\circ$  za visinu od 50 m (Slika 5.2.3.). Neophodna zapremina nasutog materijala na dužini od 1.000 m iznosi oko 1.500.000 m<sup>3</sup>. Proračunata količina gubitka uglja u ovoj konturi iznosi oko 700.000 t [150].

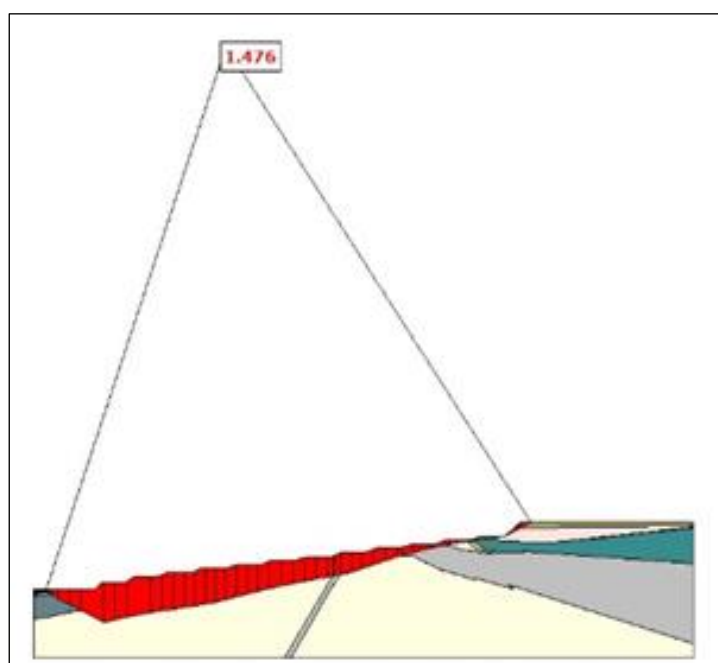


Slika 5.2.2. Proračun stabilnosti kosine sa koeficijentom pornog pritiska od 0,2 i uglom nagiba od  $9^\circ$  pre loma kosine sa faktorom sigurnosti 0,9 [150]



*Slika 5.2.3. Proračun stabilnosti nagiba generalne kosine nakon izgradnje nasipa kada je faktor sigurnosti 1,3, sa koeficijentom pornog pritiska od 0,3*

Preliminarna provera stabilnosti je pokazala da za sledeću fazu eksploatacije prema zapadu, ugao nagiba ne treba da bude veći od 8 stepeni za ukupnu visinu generalne kosine od 60 m kada je faktor sigurnosti 1,5 (Slika 5.2.4.), uz realizaciju ispravne tehnologije i aktivnim adekvatnim dopunjenim sistemom za odvodnjavanje. Površinski kop treba dalje da se razvija sa radnim parametrima na osnovu potpuno inoviranog rudarskog projekta [150].



*Slika 5.2.4. Proračun stabilnosti nagiba generalne kosine pri budućoj eksploataciji pod uglom nagiba od 8°, sa faktorom sigurnosti 1,5, sa koeficijentom pornog pritiska od 0,3 [150]*

Procenjene ukupne posledice nestabilnosti generalne kosine u obliku troškova  $C_j$  za slučaj bez preventivnih aktivnosti (Opcija 1) i  $C_{jp}$  za slučaj sa preventivnim aktivnostima (Opcija 2), prikazane su u Tabeli 5.2.1. gde su izdvojena četiri prethodno navedena važna moguća uzroka otkaza stabilnosti kosine.

**Tabela 5.2.1. Procenjene posledice kao troškovi i gubici po uzrocima otkaza (u milionima eura) [150]**

Troškovi/Gubici	$C_{pj}$	$C_{sj}$	$C_{rj}$	$C_{lj}$	$C_{hj}$	$\sum_{j=1}^m C_j$	$\sum_{j=1}^m C_{jp}$
<b>Geološki i geotehnički podaci i projekat</b>	0,1	1,4	-	-	-	1,5	1,1
<b>Pogrešna tehnologija eksploatacije</b>	0,2	2	0,7	2	0,1	5	5,3
<b>Pogrešan sistem za odvodnjavanje</b>	0,3	2,5	1	2	0,2	7	7,5
<b>Ekstremni vremenski uslovi</b>	0,5	5	2	4	0,5	12	12

Izvršena je preliminarna analiza rizika stabilnosti južne generalne kosine sa rangiranjem rizika u fazi pre nastanka loma kosine sa procenjenim vrednostima posledica, za opciju bez otkrivanja uzroka otkaza i preventivnih aktivnosti prema formuli 4.2.1.20. (poznato kao Opcija 1 u poglavlju 4) (Tabela 5.2.2.), u skladu sa postavljenom V-FMECA metodom. Takođe je obrađena i opcija sa ublažavanjem i rangiranjem rizika, koja obuhvata Opciju 2 sa uspešnom realizacijom preventivnih aktivnosti sa i bez uspešnih detekcija (Tabela 5.2.3.). Usvojeno vreme analize ( $t_a$ ) za sve uzroke iznosi 3 godine. Usvojena je minimalna prihvatljiva pouzdanost ekosistema ( $P_{smaxi} = 0,7$ ) u vremenu  $t$ , odnosno maksimalna prihvatljiva verovatnoća otkaza ( $P_{fmaxi} = 0,3$ ), za svaki od uzroka otkaza, gde su moguće preventivne aktivnosti po formuli 4.2.1.21. Za razjašnjenje poređenja RPN i RPV, u Tabeli 5.2.4. je dat opis raspodele na prioritete, intervale rizika i opis vrednosti rizika u milionima eura, gde veći prioritet za modifikovanu metodu V-FMECA i RPV ima veći vrednosni iznos u odnosu na metodu FMECA i RPN gde prioritet ima veći broj [150].

**Tabela 5.2.2. Analiza rizika i rangiranje po uzrocima kvara bez preventivnih aktivnosti (početni rizik) [150]**

Uzrok/Proces	$a_i$	$P_{fi}$	$C_i$ (M€)	RPV <sub>i</sub> (M€)	RPN
Geološki ulazni podaci/Projektovanje	0,50	0,78	1,5	1,17 (4)	3
Tehnologija/Rударstvo	0,25	0,53	5	2,65 (2)	4
Voda/Odvodnjavanje	0,33	0,63	7	4,41 (1)	5
Ekstremni vremenski uslovi	0,05	0,14	12	1,68 (3)	3

**Tabela 5.2.3. Analiza rizika i rangiranje po uzrocima kvara sa uspešnim preventivnim aktivnostima [150]**

Uzrok/Proces	$a_i$	$t_{pi}$	CPV <sub>i</sub> (M€)	RPV <sub>i</sub> (M€)	RPN
Geološki ulazni podaci/Projektovanje	0,50	0,71	1,05	0,32 (4)	2
Tehnologija/Rударstvo	0,25	1,43	5,26	1,58 (3)	3
Voda/Odvodnjavanje	0,33	1,05	7,52	2,27 (1)	4
Ekstremni vremenski uslovi	0,05	3	12	1,68 (2)	3

**Tabela 5.2.4. Raspodela po prioritetima, intervalima rizika i opisu vrednosti rizika (M€) [150]**

RPN 1	Procenjeni rizici u intervalu $0 < RPV \leq 0,2$	Veoma nizak rizik	
RPN 2	Procenjeni rizici u intervalu $0,2 < RPV \leq 0,5$	Nizak rizik	
RPN 3	Procenjeni rizici u intervalu $0,5 < RPV \leq 2$	Srednji rizik	
RPN 4	Procenjeni rizici u intervalu $2 < RPV \leq 4$	Visok rizik	
RPN 5	Procenjeni rizici u intervalu $RPV > 4$	Veoma visok rizik	

Dobijeni rezultati ukazuju na značajno smanjenje rizika u Opciji 2 za sve uzroke otkaza (Tabela 5.2.3.) i pored dodatnih ulaganja u preventivne aktivnosti kod procesa tehnologije i odvodnjavanja, koja je podatak za ublažavanje rizika i rangiranje sa uspešnim preventivnim

aktivnostima u odnosu na Opciju 1 (Tabela 5.2.2.), koja je početna opcija rizika pri stanju pre opšteg otkaza stabilnosti nagiba kosine na površinskom kopu. Planiranje odvodnjavanja predstavlja najveći prioritet sa visokim rizikom (Tabela 5.2.3.), i koje je u Opciji 1 imao veoma visok rizik (Tabela 5.2.2.). Iz toga sledi da je neophodno preduzeti maksimalne organizacione i tehničke aktivnosti uz ozbiljna ulaganja za odvodnjavanje. Zbog toga su u Opciji 2 opravdano predviđena sredstva za preventivne aktivnosti od 3 M€ (Tabela 5.2.1.) radi umanjenja rizika od otkaza od 4,41 M€ ovoga uzroka u Opciji 1 [150].

### 5.3. Rizici rehabilitacije odlagališta Kostolačkog basena uglja

Održivo i blagovremeno planiranje rehabilitacije i rekultivacije u okviru procesa zatvaranja rudnika obuhvata skup koordinisanih aktivnosti koje se sprovode tokom celokupnog životnog ciklusa rudarskog objekta, uz istovremeno ispunjavanje ekonomskih, ekoloških i društvenih kriterijuma. Zatvaranje površinskih kopova uglja, posmatrano iz ugla održivog razvoja, predstavlja integrisan proces koji započinje izradom preliminarnog plana zatvaranja, a završava se ostvarivanjem dugoročne stabilnosti terena, potpunom rekultivacijom i uspostavljanjem funkcionalnog i samoodrživog ekosistema. Implementacijom ovog održivog pristupa postižu se merljivi rezultati u pogledu efikasnosti globalne rehabilitacije i sprovođenja ciljne, funkcionalne rekultivacije, sa naglaskom na očuvanje i unapređenje kvaliteta životne sredine [156].

Proces planiranja zatvaranja površinskih kopova uglja, zajedno sa rehabilitacijom i rekultivacijom zemljišta, danas predstavlja znatno složeniji i zahtevniji zadatak u poređenju sa prethodnom praksom. Pored tradicionalne prenamene zemljišta za poljoprivredne potrebe, sve veću pažnju privlači mogućnost integracije zatvorenih površinskih kopova i spoljašnjih odlagališta u sisteme obnovljivih izvora energije, kao što su vetroparkovi, solarne elektrane i postrojenja na biomasu, jer inovativna rešenja za obnovljivu energiju i skladištenje mogu uspostaviti produktivne sekundarne živote za neaktivne lokacije rudnika i njihovih objekata.

Paralelno s tim, od suštinskog je značaja kontinuirano praćenje svih faza procesa zatvaranja, uključujući rehabilitaciju i rekultivaciju degradiranih površina. U tom kontekstu, primena V-FMECA modela omogućava identifikaciju i kvantifikaciju rizika, procenu pouzdanosti realizacije tehničkih rešenja, kao i verifikaciju geomehničke stabilnosti terena pomoću eko-kontrolnog Markovljevog modela, što obezbeđuje dinamičko modelovanje i kontrolu stanja sistema. Međutim, aktivne rudarske aktivnosti ograničavaju mogućnosti za produktivnu alternativnu upotrebu lokacije, što naravno smanjuje šanse za potencijalne izvore prihoda [156].

Pravilno planiranje i preduzimanje mera za zatvaranje rudnika i rekultivaciju do kraja njihovog životnog veka predstavljaju ključna pitanja koja rudarski sektor države mora da reši. Ove aktivnosti treba da budu usklađene sa međunarodnim standardima zaštite životne sredine, poput ISO 14001, kako bi se [156]:

- Obezbedili adekvatni resursi za sprovođenje planova zaštite životne sredine tokom rada rudnika i zatvaranja, uključujući rehabilitaciju i rekultivaciju,
- Osmislili detaljni planovi za zatvaranje uzimajući u obzir moguće pojave neočekivanih geoloških i tehnoloških uslova na lokaciji i očekivanja zajednice u vezi sa rekultivisanim korišćenjem zemljišta.

Kao pravilo planiranja, pristup zasnovan na proceni rizika trebalo bi da smanji troškove i neizvesnost. Sadašnji trendovi u planiranju zatvaranja uključuju tehnički pregled i analizu rizika, kao i troškove kompenzacije u pogledu inženjeringa i životne sredine, monitoring, pouzdanost i ekološke kontrole realizacije rekultivacije u svim fazama zatvaranja, ukoliko je rekultivacija krajnji cilj. Planovi zatvaranja rudnika uključuju sve parametre povezanog prirodnog okruženja i rudarskog sistema, uključujući nauku o životnoj sredini, društvene aspekte, kao i izdavanje dozvola i upravljanje zemljištem. U ovom smislu, rizici rehabilitacije se mogu posmatrati kao kontrolisani ekološki rizici. Dugoročna prostorna i geometrijska analiza basena je kontinuirani stalni proces, bez obzira da li se radi o nastavku eksploatacije ili zatvaranju rudnika [156].

### 5.3.1. Analiza rizika i model eko-kontrole

Za evaluaciju opcija vezanih za plan zatvaranja površinskog kopa, rehabilitaciju i održivo korišćenje zemljišta, obično se koriste obrasci rizika. Ovi obrasci omogućavaju relativno brz i jednostavan način identifikacije najbolje alternative za donošenje odluka koje uključuju više kriterijuma, u skladu sa FMEA metodom. Matrični obrasci se formiraju na osnovu verovatnoće pojave rizika rekultivacije i kriterijuma koji se razmatraju u vezi sa njihovim posledicama [156].

Najčešće korišćena metodologija u proceni rizika zasniva se na interakciji između verovatnoće da će se rizik pojaviti i posledica koje rizik može izazvati po poslovnu aktivnost i procese zaštite životne sredine ili za kompaniju u celini (FMECA). Procena rizika uključuje istoriju određenih događaja i analizu rizika (priroda, učestalost, posledice). Imajući u vidu zajednički uticaj oba parametra rizika, ukupni rizik rehabilitacije predstavlja se kao proizvod numerički procenjenih nivoa usklađenih sa matričnim prikazom FMECA metode (Tabela 5.3.1.1.) [156].

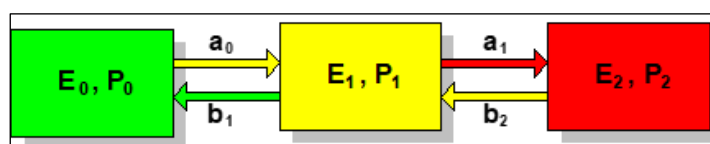
**Tabela 5.3.1.1. Matrica rizika [156]**

Posledice Verovatnoća	Beznačajne $K_1 = 1$ $C \leq 0,2 \text{ M€}$	Male $K_2 = 2$ $C = (0,2 \div 0,4) \text{ M€}$	Srednje $K_3 = 3$ $C = (0,4 - 0,8) \text{ M€}$	Velike $K_4 = 4$ $C = (0,8 - 1,5) \text{ M€}$	Veoma velike $K_5 = 5$ $C > 1,5 \text{ M€}$
Vrlo mala $K_6 = 1$ $P_f < 0,1$	VEOMA NIZAK RIZIK	VEOMA NIZAK RIZIK	NIZAK RIZIK	NIZAK RIZIK	SREDNJI RIZIK
Mala $K_7 = 2$ $P_f = 0,1 \div 0,2$	VEOMA NIZAK RIZIK	NIZAK RIZIK	SREDNJI RIZIK	SREDNJI RIZIK	SREDNJI RIZIK
Srednja $K_8 = 3$ $P_f = 0,1 \div 0,2$	NIZAK RIZIK	SREDNJI RIZIK	SREDNJI RIZIK	SREDNJI RIZIK	VISOK RIZIK
Velika $K_9 = 4$ $P_f = 0,4 \div 0,8$	NIZAK RIZIK	SREDNJI RIZIK	SREDNJI RIZIK	VISOK RIZIK	EKSTREMNI RIZIK
Veoma velika $K_{10} = 5$ $P_f > 0,8$	SREDNJI RIZIK	SREDNJI RIZIK	VISOK RIZIK	EKSTREMNI RIZIK	EKSTREMNI RIZIK

Procena troškova rekultivacije vrši se na osnovu plana zatvaranja rudnika i mora se redovno ažurirati kako bi bila usklađena sa promenama u rudarsko-geološkim i ekološkim uslovima. Takođe je neophodno je kontinuirano praćenje procesa zatvaranja rudnika tokom faza rehabilitacije i rekultivacije degradiranog prostora.

Sistem rekultivacije, u zavisnosti od njegove efikasnosti, može se modelovati kroz tri stanja označena kao  $E_0$ ,  $E_1$  i  $E_2$ , u okviru Markovljevog stohastičkog procesa. Ova metoda preporučena je za procenu verovatnoće otkaza u skladu sa standardom ISO 31010. Stanje  $E_0$  predstavlja normalan režim funkcionisanja sistema rekultivacije; stanje  $E_1$  ukazuje na prisutnu ugroženost u okviru dozvoljenih vremenskih granica; dok stanje  $E_2$  označava kritičnu ekološku situaciju, u kojoj su uticaji na životnu sredinu van prihvatljivih i vremenski dozvoljenih granica [156].

Primena intenzivnijih mera rekultivacije omogućava povratak sistema iz stanja  $E_2$  u stanje  $E_1$ , a zatim i u stanje  $E_0$ . Ova dinamika stanja može se prikazati putem usmerenog grafika, gde se primenjuje osnovno načelo Markovljevog procesa: zbir svih izlaznih tokova verovatnoća iz jednog stanja jednak je zbiru ulaznih tokova u to stanje. U slučaju ekosistemske rekultivacije, ovaj grafik stanja oblikuje Markovljev lanac sa tri čvora (videti Sliku 5.3.1.1.) [156].



*Slika 5.3.1.1. Prikaz stanja rekultivacije [156]*

Intenziteti prelaza  $a_0$  i  $a_1$  prikazuju se kao strelice koje vode sleva nadesno, dok se intenziteti  $b_1$  i  $b_2$  prikazuju kao strelice koje vode zdesna nalevo. Za ovaj model, granične verovatnoće stanja izražavaju se sledećim formulama, izvedenim iz osnovne jednačine 4.2.1.23.:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{a_0}{b_1} + \frac{a_0 a_1}{b_1 b_2}}$$

$$P_1 = \frac{a_0}{b_1} \cdot P_0$$

$$P_2 = \frac{a_0 a_1}{b_1 b_2} \cdot P_0$$

Čija suma je jednaka 1.

Na osnovu ukupne verovatnoće, određeni su rizici ekološke rekultivacije/sanacije pod kriterijumima nastanka ekstremne situacije, i to:

$$P_2 = 1 - P_0 - P_1$$

### 5.3.2. Primeri rehabilitacije unutrašnjih i spoljašnjih odlagališta u Kostolačkom basenu

Kostolački basen uglja je podeljen na četiri ležišta: Drmno, sa aktivnim površinskim kopom u krajnjem istočnom delu basena (površinski kop Drmno - 9.000.000 t/god), zatvoreni površinski kop Ćirikovac, koji zauzima centralni deo Kostolačkog basena, zatvoreni površinski kop Klenovnik, i zapadni deo Kostolačkog basena (Smederevsko Pomoravlje), koji zauzima zapadni deo basena, od reke Velike Morave do granice sa ležištem Ćirikovac.

U skladu sa definisanim metodološkim pristupom i Zakonom o rudarstvu Republike Srbije, svi površinski kopovi u Kostolačkom basenu uglja imaju plan zatvaranja u svim fazama izrade projektne dokumentacije. U okviru te dokumentacije, zaštita životne sredine se uglavnom realizuje kroz detaljnu tehničku i biološku rekultivaciju [156].

#### 5.3.2.1. Rehabilitacija i rekultivacija spoljašnjih odlagališta površinskog kopa Klenovnik

Eksploatacija uglja na površinskom kopu Klenovnik započela je 1973. godine, a završena je 2009. godine. Dugotrajno odlaganje sprovođenja stabilne rehabilitacije dovelo je do povećanja verovatnoće pojave rizika. Takođe, analiza uslova rehabilitacije u vezi sa mogućnošću pojave promena mehaničkih osobina tla usled natapanja pokazala je da na ovoj lokaciji ne postoji potencijal za to. Na osnovu pokazatelja posledica i verovatnoće događaja, kao i u odnosu na ostale geomehaničke faktore, procenjeno je da ovaj projekat rehabilitacije nosi srednji nivo rizika, zbog potencijalne ugroženosti životne sredine i interesa lokalne zajednice. Prema V-FMECA metodi i Tabeli 5.3.1.1., nivo rizika se određuje kao:

Posledice – **Srednje** ( $K_3 = 3$ )  $\times$  Verovatnoća – **Mala** ( $K_7 = 2$ ) = Ukupni rizik: **6**

Upoređivanjem vremena zatvaranja površinskog kopa Klenovnik sa periodom završetka eksploatacije, jasno se zaključuje da je rekultivacija sprovedena u stanju  $E_2$ , uz pripadajuću verovatnoću  $P_2$  (Slika 5.3.1.1.). Ovo stanje predstavlja lošu ekološku situaciju, u kojoj je ugroženost životne sredine premašila dozvoljene vremenske granice.

Prelazak iz stanja  $E_0$  u  $E_1$  dogodio se tokom perioda od 24 meseca, dok je prelazak iz  $E_1$  u  $E_2$  trajao 12 meseci. Planirano je da prelazak iz  $E_2$  u  $E_1$ , sa verovatnoćom  $P_1$ , traje 8 meseci, dok se prelazak iz  $E_1$  u  $E_0$ , sa verovatnoćom  $P_0$ , očekuje tokom narednih 10 meseci. Izračunate vrednosti verovatnoća prikazane su u Tabeli 5.3.2.1.1.

**Tabela 5.3.2.1.1. Verovatnoće planiranih uslova rekultivacije na spoljašnjim odlagalištima površinskog kopa Klenovnik [156]**

Stanje/Verovatnoća	$E_0/P_0$	$E_1/P_1$	$E_2/P_2$
Verovatnoća	0,588	0,247	0,165

Uslovno normalno stanje postojećeg sistema rekultivacije (stanja  $E_0$  i  $E_1$ ) ima visoku verovatnoću realizacije (84%) i karakteriše se prema FMECA sa **niskim rizikom**:

$$\text{Posledice} - \text{Male} (K_2 = 2) \times \text{Verovatnoća} - \text{Mala} (K_7 = 2) = 4$$

Prema modifikovanoj metodi V-FMECA za verovatnoću  $P_f = P_2 = 0,165$  i vrednost posledica od  $C = 0,3 \text{ M€}$ , nizak rizik iznosi  $R = 0,05$ .

Za obezbeđivanje planirane dinamike rehabilitacije potrebno je preduzeti relativno mali broj preventivnih aktivnosti [156].

### 5.3.2.2. Rehabilitacija i rekultivacija spoljašnjih odlagališta površinskog kopa Ćirikovac

Površinski kop Ćirikovac otvoren je 1973. godine, a eksploatacija je završena 2009. godine. Oko  $75 \times 10^6 \text{ čm}^3$  otkrivke sa površinskog kopa Ćirikovac deponovano je na zapadno spoljašnje odlagalište Petka, dok je približno  $36 \times 10^6 \text{ čm}^3$  otkrivke deponovano na spoljašnje odlagalište Mlava–Mogila.

Dug vremenski period nakon prestanka eksploatacije na površinskom kopu Ćirikovac značajno je povećao verovatnoću pojave ekoloških i ekonomskih rizika. Shodno tome, projektovane verovatnoće rizika u vezi sa rehabilitacijom spoljašnjih deponija Mlava–Mogila i Petka svrstavaju se u kategoriju **niskog rizika** (Tabela 5.3.1.1.):

$$\text{Posledice} - \text{Beznačajne} (K_1 = 1) \times \text{Verovatnoća} - \text{Mala} (K_7 = 2) = 2$$

Zbog značajnog kašnjenja u započinjanju aktivnosti rekultivacije, jasno je utvrđeno da je lokalitet prešao iz stanja  $E_0$  u stanje  $E_1$  sa verovatnoćom  $P_1$  tokom perioda od 26 meseci, a zatim u stanje  $E_2$  sa verovatnoćom  $P_2$  u narednih 12 meseci (Slika 5.3.1.1.). Stanje  $E_2$  označava lošu ekološku situaciju, u kojoj ugrožavanje životne sredine premašuje dozvoljene vremenske granice.

Planiran je prelazak iz stanja  $E_2$  u stanje  $E_1$  u trajanju od 8 meseci, a zatim iz stanja  $E_1$  u stanje  $E_0$  tokom narednih 6 meseci. Odgovarajuće izračunate vrednosti verovatnoća prikazane su u Tabeli 5.3.2.2.1. [156].

**Tabela 5.3.2.2.1. Verovatnoće planiranih uslova rekultivacije na spoljašnjim odlagalištima površinskog kopa Ćirikovac [156]**

Stanje/Verovatnoća	$E_0/P_0$	$E_1/P_1$	$E_2/P_2$
Verovatnoća	0,726	0,164	0,110

Uslovno normalno stanje postojećeg sistema rekultivacije ima visoku verovatnoću realizacije (89%) i svrstava se u kategoriju **niskog rizika** (Tabela 5.3.1.1.):

$$\text{Posledice} - \text{Male} (K_2 = 2) \times \text{Verovatnoća} - \text{Mala} (K_6 = 1) = 2$$

Prema modifikovanoj metodi V-FMECA za verovatnoću  $P_f = P_2 = 0,11$  i vrednost posledica od  $C = 0,2 \text{ M€}$ , veoma nizak rizik iznosi  $R = 0,02$ .

Za obezbeđivanje planirane dinamike rehabilitacije potrebno je preduzeti mali broj preventivnih aktivnosti [156].

Na osnovu rezultata postojećih istraživanja o uslovima za pojavu likvefakcije na lokacijama Petka i Mlava–Mogila, zaključeno je da postoji 19% verovatnoće za pojavu likvefakcije tla na ispitivanom području. Shodno tome, i pored izražene mogućnosti njenog nastanka i prisustva drugih geomehaničkih faktora, realizacija projekta rehabilitacije sa tog aspekta procenjena je kao prihvatljiv **srednji rizik** (Tabela 5.3.1.1.):

$$\text{Posledice} - \text{Srednje} (K_3 = 3) \times \text{Verovatnoća} - \text{Velika} (K_9 = 4) = 12$$

### 5.3.2.3. Realizacija rehabilitacije i rekultivacije spoljašnjeg i unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Drmno

Na rekultivisanom degradiranom terenu nastalom odlaganjem na spoljašnjem odlagalištu površinskog kopa Drmno, određena je namena za različite tehničke svrhe. Za taj cilj, deponija je konačno meliorisana i rekultivisana do stanja pogodnog za poljoprivrednu proizvodnju, livade, pašnjake ili druge namene.

Na osnovu postojećih istraživanja o uslovima za pojavu likvefakcije tla na lokaciji spoljašnje deponije kopa Drmno, utvrđeno je da ne postoji potencijal za pojavu likvefakcije. U tom smislu, kao i zbog drugih geomehaničkih parametara, verovatnoća pojave rizika procenjena je kao **srednji rizik** (Tabela 5.3.1.1.):

$$\text{Posledice} - \text{Srednje } (K_3 = 3) \times \text{Verovatnoća} - \text{Mala } (K_7 = 2) = 6$$

Prema novom projektu izgradnje vetroparka, nivo održivog i ekonomski opravdanog korišćenja završenog rehabilitovanog spoljašnjeg odlagališta površinskog kopa Drmno biće značajno povećan.

## 5.4. Procena ekoloških rizika površinskog odvodnjavanja na površinskom kopu Drmno

Odvodnjavanje površinskih kopova predstavlja ključni proces za osiguranje sigurne i stabilne proizvodnje mineralnih sirovina u kompleksnim geološkim i klimatskim uslovima, posebno u uslovima sve složenijih i nepredvidivih hidroloških procesa [157]. Elementi sistema odvodnjavanja se projektuju i implementiraju s ciljem da zadovolje sve kapacitativne, tehnološke i ekološke zahteve. Tehnološka pouzdanost sistema odvodnjavanja i integritet ekosistema su ugroženi zbog klimatskih promena, kvarova opreme i nedostatka adekvatnog održavanja, što može dovesti do nepredviđenih problema u sigurnom radu sistema. Posledice nepouzdanosti sistema površinskog odvodnjavanja unutar ekosistema mogu uključivati nestabilnost kosina, klizišta, poplave, zamuljivanje i pogoršanje kvaliteta podzemne i površinske vode van konture kopa. Ovi problemi mogu rezultirati značajnim troškovima za sanaciju kosina, prečišćavanje vode, popravku opreme i gubitke u proizvodnji, naročito u slučaju većih incidenata [100][144][145]. Sa ekološke strane, poplave direktno ugrožavaju ljude i živi svet, posebno zbog često neophodnog ispumpavanja neprimerene vode u rečne tokove [139].

Porast učestalosti i intenziteta ekstremnih padavina, izazvan klimatskim promenama, predstavlja sve veći rizik za infrastrukturu za upravljanje površinskim vodama, opremu i proizvodnju uglja. Ovi izazovi zahtevaju stalnu adaptaciju i donošenje novih inženjerski-izazovnih odluka u okviru rada površinskih kopova [100]. Sadašnji i očekivani budući uticaji ekstremnih klimatskih događaja zahtevaju održiva rešenja usmerena na prilagođavanje klimatskim promenama i smanjenje rizika od poplavnih katastrofa, što je naročito izraženo u površinskoj eksploataciji. Efikasne strategije uključuju osiguranje od poplava, sisteme za prognozu i rano upozoravanje, kontinuirano projektovanje i planiranje dinamike realizacije sistema površinskog odvodnjavanja u skladu sa analizom pouzdanosti, troškova i povratnog perioda, kao i unapređenje upravljanja, edukacije i pouzdanosti samog sistema.

U svetu postoji obimno istraživanje u svim naučnim oblastima vezanim za vodu, poplave i meteorološke uslove [158][99][159]. Promene u režimu padavina u 21. veku u poređenju sa 20. vekom su značajne, te klimatolozi danas često koriste skraćeni povratnog perioda od 30 godina za procenu ekstremnih padavina.

Katastrofalna poplava u Srbiji izazvala je ogromne posledice i visoke troškove sanacije infrastrukturnih objekata, opreme, klizišta i zastoja u proizvodnji uglja [125]. Ovaj događaj je ukazao na potrebu za ozbiljnom promenom pristupa u dimenzionisanju objekata sistema površinskog odvodnjavanja na površinskim kopovima, kroz skraćivanje povratnog perioda za intenzivne padavine, povećanje pouzdanosti sistema odvodnjavanja i generalno površinskog kopa, i usklađivanje sa pristupom upravljanja rizicima kroz životni ciklus rudnika i standardom ISO 31000:2018.

#### **5.4.1. Prirodna, tehnička i strukturna analiza sistema površinskog odvodnjavanja**

Osnovni elementi tehničkog podsistema sistema površinskog odvodnjavanja uključuju kanale, vodosabirnike i pumpne stanice sa cevovodima. Projektni parametri i investicioni troškovi ovih elemenata zavise od predviđenog dotoka vode i zahtevanog nivoa pouzdanosti sistema. Ukupna pouzdanost sistema površinskog odvodnjavanja na površinskom koku određuje se kao proizvod pouzdanosti tri međuzavisne stohastičke promenljive u vremenu i prostoru: prirodnog podsistema, tehničkog podsistema i procesa upravljanja odvodnjavanjem.

Shodno tome, verovatnoća otkaza sistema površinskog odvodnjavanja u velikoj meri zavisi od intenziteta klimatskih promena, koje se manifestuju kroz promene u povratnim periodima i intenzitetu ekstremnih padavina. Kontinuirane promene granica površinskog kopa dovode do promena u konfiguraciji slivnih područja i dotoku površinskih voda u površinski kop, što dalje utiče na sve tehničke parametre sistema površinskog odvodnjavanja, naročito na njegovu pouzdanost i upravljačke procese.

Kako je sistem površinskog odvodnjavanja praktično serijski, otkaz bilo kog od elemenata dovodi do delimičnog i zatim punog otkaza sistema sa velikim uticajem na životnu sredinu. Složenost ekosistema i pogoršani klimatski uslovi povlače potrebu za povećanjem pouzdanosti, kapaciteta i obavezno sprovođenje planiranog održavanja opreme i terenskih objekata sistema odvodnjavanja sa učestanim preventivnim aktivnostima, monitoringom i kontrolom kvaliteta [139].

Proračun rizika u ovom primeru vrši se prema standardnoj formuli 4.2.1. kao proizvod ukupne verovatnoće otkaza sistema i posledica otkaza. Za sveobuhvatnu procenu prihvatljivog rizika sistema površinskog odvodnjavanja predlaže se upotreba dva međuzavisna kriterijuma prihvatljivog rizika.

Prvi kriterijum odnosi se na verovatnoću otkaza sistema površinskog odvodnjavanja, što je ključni tehnički parametar koji definiše neophodnu prihvatljivu verovatnoću otkaza za potrebe proračuna rizika [124][137]. Drugi kriterijum odnosi se na nivo rizika koji je prihvatljiv za kompaniju u skladu sa njenim finansijskim mogućnostima. Nakon definisanja ovih kriterijuma, izračunati rizik se upoređuje sa njima. Ukoliko procenjeni rizik nije u skladu sa prihvatljivim vrednostima, proces se ponavlja.

U suprotnom, ukoliko je rizik unutar prihvatljivih granica, sledeće aktivnosti se sprovede u skladu sa standardom ISO 31000:2018 [113], koji propisuje tretman rizika kroz opcije: prihvatanje rizika, smanjenje posledica ili smanjenje verovatnoće otkaza sistema. Nakon toga sledi kontinuirano praćenje, preispitivanje i stalna komunikacija sa eventualnim neophodnim konsultacijama.

#### **5.4.2. Pouzdanost sistema površinskog odvodnjavanja i evaluacija prihvatljivog rizika**

Prema standardnoj formuli 4.2.1., rizik ( $R$ ) povezan sa sistemom površinskog odvodnjavanja računa se kao proizvod ukupne verovatnoće otkaza sistema ( $P_f$ ) i ukupnih procenjenih posledica, odnosno gubitaka i troškova sanacije, usled ekstremnih padavina i poplava izazvanih  $i$ -tim uzrokom, pri čemu se rizik obično izražava u novčanim jedinicama.

Posledice otkaza sistema površinskog odvodnjavanja najčešće podrazumevaju finansijske gubitke zbog ugrožavanja životne sredine, oštećenja lokalne infrastrukture, pojave klizišta i erozije, prisustva mulja na dnu površinskog kopa, oštećenja rudarske opreme i objekata, kao i direktne gubitke u proizvodnji.

Verovatnoća otkaza sistema površinskog odvodnjavanja ( $P_f$ ), tretirana kao stohastički proces, predstavlja verovatnoću da dođe do otkaza makar jednog podsistema u okviru analiziranog vremenskog perioda  $t$  (u godinama). Ova verovatnoća se, na osnovu eksponencijalne raspodele formule 4.2.1.20., izražava kao [136]:

$$P_f = 1 - \exp(-a \cdot t)$$

Za eksponencijalnu raspodelu:

- Intenzitet otkaza ( $a$ ) *prirodnog podsistema* zavisi od povratnog perioda ekstremnih padavina ( $T$ ), tako da važi po formuli 4.2.1.7.:

$$a = \frac{1}{T}$$

- Intenzitet otkaza ( $a$ ) *tehničkog podsistema* i procesa upravljanja odvodnjavanjem zavisi od prosečnog vremena pouzdanosti ( $t_r$ ), pri čemu važi:

$$a = \frac{1}{t_r}$$

Pouzdanost sistema površinskog odvodnjavanja sastoji se od dva glavna podsistema:

- Pouzdanost tehničkog podsistema ( $P_{rt}$ ), koja obuhvata:
  - $P_{rc}$ : pouzdanost kanala i sakupljača vode, sa aspekta geotehničke stabilnosti i održavanja,
  - $P_{rp}$ : pouzdanost pumpnih stanica i cevovoda.
- Pouzdanost prirodnog podsistema ( $P_{rn}$ ), koja zavisi od hidroloških faktora i povratnih perioda.

Ovi podsistemi se smatraju povezanim u serijsku vezu, pa ukupna verovatnoća otkaza sistema iznosi:

$$P_f = 1 - (P_{rt} \cdot P_{rn}) = 1 - (P_{rc} \cdot P_{rp} \cdot P_{rn})$$

Prihvatljiv rizik sistema površinskog odvodnjavanja određuje se unapred definisanim kriterijumima pouzdanosti, koji se mogu izraziti kao procenat prihvatljivih troškova u odnosu na ukupne posledice koje bi proistekle iz otkaza sistema. To znači da verovatnoća otkaza mora biti jednaka ili manja od maksimalnog procentualnog učešća troškova koje je kompanija spremna da prihvati u slučaju otkaza.

#### 5.4.3. Evaluacija rizika sistema površinskog odvodnjavanja

Na osnovu uspostavljenog modela za procenu rizika V-FMECA, izvršena je analiza ukupne pouzdanosti sistema površinskog odvodnjavanja na primeru površinskog kopa lignita Drmno. Posebno je važno istaći da su krajem jula 2014. godine ekstremne padavine izazvale poplave i zamuljivanje kopa, što je dovelo do izuzetno velikih posledica po objekte, opremu i proizvodnju uglja. Troškovi sanacije i rehabilitacije tada su premašili 9 miliona eura [14][125]. Nešto manja poplava dogodila se ponovo u julu 2023. godine, što ukazuje na činjenicu da dotadašnje mere za povećanje pouzdanosti sistema površinskog odvodnjavanja nisu bile dovoljne.

Nova međunarodna iskustva i dobra praksa ukazuju na potrebu da se maksimalni povratni period ekstremnih padavina koriguje na 30 godina, u skladu sa savremenim klimatskim uslovima. Ova korekcija omogućava bolje usklađivanje troškova posledica otkaza sistema površinskog odvodnjavanja sa investicionim troškovima potrebnim za izgradnju pouzdanijeg sistema.

Na osnovu analize novoformiranih hidroloških podataka, proračuni pokazuju da će u narednih pet godina ( $t = 5$ ) biti neophodno izgraditi:

- 13 etažnih kanala,
  - 7 interventnih i 2 glavna kolektora sa pumpnim stanicama,
- kako bi se obezbedila adekvatna zaštita kopa od površinskih voda.

Procenjeni ukupni troškovi sanacije posledica otkaza sistema površinskog odvodnjavanja ( $\sum C_i$ ) iznose oko 7,6 miliona eura. U ove troškove uključeni su:

- Ispumpavanje vode uz izgradnju dodatnog cevovoda i formiranje nove pumpne stanice,
- Uklanjanje erozionog mulja sa radnih etaža,
- Vađenje i rehabilitacija poplavljenе opreme,
- Sanacija pristupnih saobraćajnica i objekata u okviru kopa,
- Gubici u proizvodnji uglja.

Proračun je izveden na osnovu definisanog nivoa prihvatljivog rizika otkaza sistema površinskog odvodnjavanja (SPO), u skladu sa širim okvirom upravljanja rizicima.

Analiza pokazuje da je za prihvaćeni povratnog perioda od 30 godina, intenzitet kvara izračunat kao  $a_{30} = 0,033$  za predstojeći petogodišnji projekat. U skladu s tim, prirodna pouzdanost za ovaj period je određena kao  $P_{rn30} = 0,85$ . Održavanje elemenata sistema površinskog odvodnjavanja je ključno, pri čemu je pouzdanost sistema održavanja  $P_{rc} = 0,9$  kao deo upravljačkog procesa.

Inicijalni proračun, pretpostavljajući prihvatljivu pouzdanost pumpne stanice od  $P_{rp} = 0,7$ , daje ukupnu verovatnoću kvara sistema površinskog odvodnjavanja od  $P_f = 0,46$ , što se smatra neprihvatljivim za efikasan rad sistema sa vrednošću rizika od 3,50 M€..

Kako bi se poboljšao sistem, značajno su povećani kapaciteti pumpnih stanica, čime je postignuta pouzdanost pumpne stanice od  $P_{rp} = 0,8$ . Ova modifikacija je smanjila ukupnu verovatnoću kvara sistema površinskog odvodnjavanja na  $P_f = 0,39$  (kako je prikazano u Tabeli 5.4.3.1.), čime je rizik smanjen na vrednost od 2,96 M€.

**Tabela 5.4.3.1. Ukupni godišnji investicioni troškovi sistema površinskog odvodnjavanja, njihov linearni rast sa periodom povrata od 30 godina i verovatnoće otkaza i rizici sa posledicama od 7,6 miliona eura**

Ukupne godišnje investicije u SPO (M€)	Povećanje investicionih troškova (M€)	Intenzitet otkaza pumpnih stanica (a)	Pouzdanost pumpnih stanica ( $P_{rp}$ )	Ukupna verovatnoća otkaza sistema ( $P_f$ )	Rizik ( $R = P_f * \sum 7,6$ ) (M€)
6,70	-	0,07	0,70	0,46	3,50
7,40	0,7	0,05	0,80	0,39	2,96
7,80	1,1	0,02	0,90	0,30	2,28

Kako bi se postigla željena ukupna pouzdanost sistema površinskog odvodnjavanja od  $P_{rs} = 0,7$ , dizajn je prilagođen uvođenjem paralelnih veza i dodatnih pumpi u glavne pumpne stanice. Ovim poboljšanjem, pouzdanost pumpnih stanica je povećana na  $P_{rs} = 0,9$ . Kao rezultat, ukupna verovatnoća otkaza sistema površinskog odvodnjavanja smanjena je na  $P_f = 0,30$ , a povezani rizik je dodatno smanjen na 2.28 M€.

Kao što je prikazano u Tabeli 5.4.3.1., prihvatljivo rešenje koje podrazumeva paralelno povezivanje dodatnih pumpi na glavnim i centralnim pumpnim stanicama rezultira povećanom efikasnošću i kapacitetom, uz prihvatljivu verovatnoću otkaza. Ova opcija je ekonomski opravdana za kompaniju, imajući u vidu da su dodatni troškovi potrebni za izgradnju pouzdanijeg sistema, koji može bezbedno da podnese 20% povećanja ekstremnih padavina, manji u odnosu na smanjenje rizika. S obzirom na stalno širenje granica kopa, objekti za odvodnjavanje se kontinuirano unapređuju u skladu sa pristupom upravljanja životnim ciklusom sistema (engl. *Life Cycle Management*), čime se provera dozvoljenog rizika praktično usklađuje sa godišnjim planovima proizvodnje. Istovremeno, neophodno je održavati visok nivo tehnološke discipline u realizaciji i održavanju sistema površinskog odvodnjavanja.

#### 5.4.4. Optimizacija rizika ekosistema površinskog kopa Drmno

Kao izdvojeni primer, analizirane su mogućnosti optimizacije ekološkog rizika kod odvodnjavanja površinskog kopa, sa sistemom koji obuhvata prikazanu strukturu sa stalnim realnim tehničkim promenama (Slika 5.4.4.1.).



Slika 5.4.4.1. Izgled glavnog vodosabirnika sa taložnikom i pumpnom stanicom na površinskom koku Drmno [139]

Prema utvrđenoj metodologiji procene ekoloških rizika (V-FMECA) i dobroj praksi, usvojeni su svi parametri neophodni za proračun, prema odgovarajućim formulama za tri postavljene moguće iterativne opcije. Analiza je izvršena za srednje vreme do otkaza ekosistema  $T_s = 6$  meseci, dok planirano vreme analize iznosi  $T_a = 3$  meseca (Slika 5.4.4.2.) [139].

a	0,17	a	0,17	a	0,17
$T_s$	6,00	$T_s$	6,00	$T_s$	6,00
$t_a$	3,00	$t_a$	3,00	$t_a$	3,00
$t_d$	0,00	$t_d$	0,00	$P_{fmax}$	0,20
$T_p$	0,00	$T_p$	0,00	$1 - P_{fmax}$	0,80
$t_p$	0,00	$t_p$	1,00	$t_{pmax}$	<b>1,34</b>
$C_i$	0,90	$C_i$	0,90	$C_i$	0,90
$P_f$	0,39	$P_f$	0,28	$P_f$	0,20
<b>RPV</b>	<b>0,35</b>	<b>RPV</b>	<b>0,26</b>	<b>RPV</b>	<b>0,18</b>

Slika 5.4.4.2. Primer procene rizika sistema površinskog odvodnjavanja površinskog kopa (Početno stanje sistema, I iteracija, II iteracija) [139]

U početnom stanju (Slika 5.4.4.2. a) nema granične dopuštene vrednosti verovatnoće otkaza ekološkog sistema i mogućnosti povezane detekcije sa korekcijom i moguće prevencije. Verovatnoća otkaza sistema (formula 4.2.1.20.) ima veliku vrednost i iznosi  $P_f = 0,39$ . Prosečni mogući troškovi posledica otkaza iznose  $C_{PV} = 0,9$  Meur (formula 4.2.2.2.), tako da je rizik  $RPV = 0,35$  Meur (formula 4.2.1.) sa vrednosnim rangom 1 i rangom prioriteta 3. Nakon otkaza, jasno je da ova opcija ima najveće ekološke, ekonomske i socijalne posledice za površinski kop [139].

U prvoj iteraciji (Slika 5.4.4.2. b), prema zakonskoj regulativi, ugroženost se kontroliše monitoringom sa detekcijom, a uklanja ili umanjuje pravovremenom prevencijom, tako da se moguće posledice otkaza značajno umanjuju. Pri takvom pristupu, verovatnoća otkaza ekosistema iznosi  $P_f = 0,28$ . Za moguće iste troškove uklanjanja posledica, rizik je  $RPV = 0,26$  Meur sa vrednosnim rangom 2 i sa rangom prioriteta 2 [139].

Za obe opcije varijantno postoji mogućnost nove procene u drugoj iteraciji, za slučaj zakonski definisane maksimalne dopuštene verovatnoće otkaza elemenata i celog ekološkog sistema, u odnosu na odvodnjavanje površinskog kopa. Ukoliko je u tako postavljenoj trećoj opciji (Slika 5.4.4.2. c), maksimalno dopuštena verovatnoća otkaza  $P_{fmax} = 0,2$ , onda granično ili maksimalno vreme završetka planiranih preventivnih aktivnosti iznosi  $t_{pmax} = 1,34$  meseca (formula 4.2.3.2.). Za iste troškove uklanjanja posledica otkaza rizik je  $RPV = 0,18$  Meur sa vrednosnim rangom 3 i rangom prioriteta 1. Na taj način, uz efikasno upravljanje rizicima, moguće je organizovano sprovesti

preventivne mere u predviđenom roku. To omogućava postizanje maksimalno prihvatljive, ali i optimalne verovatnoće otkaza, uz minimalne posledice na ekosistem površinske eksploatacije u odnosu na troškove održavanja [139].

## 6. DISKUSIJA I INTERPRETACIJA REZULTATA

Rezultati sprovedene analize ekoloških rizika primenom V-FMECA metode na odabranim površinskim kopovima ukazuju na veliki potencijal ove metode za precizno identifikovanje, kvantifikovanje i prioritizaciju rizika koji ugrožavaju životnu sredinu i stabilan rad površinskog kopa. Kroz analizu četiri različite studije slučaja sa specifičnim problematikama i uzrocima otkaza, metod je omogućio sistematski uvid u međusobne zavisnosti različitih internih i eksternih rizika na površinskim kopovima, i sveobuhvatan pregled posledica koje oni mogu imati po ekosistem, zdravlje ljudi i ekonomsku održivost rudarskih aktivnosti.

Za razliku od klasične FMECA metode, gde se rizici ocenjuju na osnovu subjektivne ocene (RPN) koja je rezultat ekspertske verovatnoće, posledica i mogućnosti otkrivanja, V-FMECA metodologija koristi unapređeni pristup uvođenjem vrednosti prioriteta rizika (RPV) koja uključuje i proračun verovatnoće pojave otkaza ekosistema i ekonomski aspekt posledica, izražen kroz neto sadašnju vrednost troškova. Na ovaj način je omogućeno objektivnije poređenje rizika, što je ključno za donošenje strateških odluka u upravljanju rudarskim objektima.

U poređenju sa tradicionalnim metodama procene rizika koje se najčešće oslanjaju na kvalitativne i deskriptivne pokazatelje, V-FMECA pruža kvantitativnu osnovu za donošenje odluka. Time se smanjuje stepen subjektivnosti u oceni rizika, a sam proces planiranja i implementacije mera postaje transparentniji i ekonomski efikasniji. Uvođenje finansijskog kriterijuma kroz vrednosnu analizu posledica omogućava donošenje održivih odluka koje su ujedno ekološki i socijalno odgovorne i ekonomski opravdane.

Takođe je značajno napomenuti da ovaj oblik analize i evaluacije rizika omogućava ne samo objektivnije rezultate, već i jednostavnost u kombinovanju potencijalnih negativnih uticaja velikog broja različitih rizika, koji su svi povezani kao što je već objašnjeno u poglavlju 2.

Nakon detaljnog istraživanja u ovoj oblasti i razvijanja modela, može se zaključiti da je V-FMECA pokazala sledeće prednosti u odnosu na standardne metode:

1. Objektivnije rangiranje rizika (RPV umesto RPN):  
Umesto klasičnog RPN (engl. *Risk Priority Number*), koji je proizvod subjektivno ocenjenih faktora (verovatnoće, posledice, detektabilnosti), V-FMECA koristi RPV (engl. *Risk Priority Value*) koji uključuje i neto sadašnju vrednost posledica i verovatnoće pojave otkaza ekosistema, čime se dobija preciznija slika o stvarnom uticaju svakog rizika.
2. Ekonomska komponenta odlučivanja:  
Uključivanjem troškova sanacije, gubitaka u proizvodnji, kazni i dugoročnih ekoloških i socijalnih posledica, V-FMECA omogućava donošenje optimalnih odluka u pogledu prevencije i ublažavanja rizika u kontekstu troškova, što je najvažnija komponenta poslovanja.
3. Povezivanje rizika kao sistemski zavisnih faktora:  
Umesto da posmatra otkaze kao izolovane događaje, V-FMECA prepoznaje međuzavisnost između uzroka i efekata rizika unutar kompleksnog sistema, što je posebno važno u složenim sistemima kao što su površinski kopovi, gde jedna promena može da utiče na sve nivoe funkcionisanja.
4. Pogodna za složene i visoko rizične sisteme:  
Zbog svoje kvantitativne prirode i fleksibilnosti, metoda se može efikasno primeniti u sektorima gde postoji visok stepen neizvesnosti, višestruki uticaji (tehnički, ekološki, ekonomski, socijalni itd.), i potreba za preciznim upravljanjem resursima.
5. Povećana transparentnost u odlučivanju:  
Zasnovana na jasno definisanim numeričkim kriterijumima upravljanja rizicima, V-FMECA omogućava donošenje odluka koje su lakše dokumentovane, transparentne i odbranjive pred regulatornim telima, upravom ili javnošću.
6. Fokus na prevenciju kroz optimizaciju resursa:

Pomaže u prioritizaciji preventivnih i korektivnih mera prema stvarnoj vrednosti rizika, čime se izbegava nepotrebno trošenje resursa na nisko rizične faktore.

7. Integracija u sistem održivog razvoja:

Efikasno podržava koncept održivog rudarstva, jer omogućava sagledavanje ekoloških, tehničkih i ekonomskih aspekata u jedinstvenom sistemu analize.

Međutim, primena V-FMEA metode ima i svoja ograničenja. Preciznost rezultata u velikoj meri zavisi od kvaliteta ulaznih podataka i formirane baze podataka, naročito u pogledu procene verovatnoće i finansijskih posledica otkaza. Potrebno je kontinuirano ažurirati baze podataka i unapređivati modele prognoze, kako bi se obezbedila relevantnost i tačnost analiza u promenljivim uslovima eksploatacije.

Primećene mane ove metode su sledeće [150]:

1. Tačnost i pouzdanost kvantitativne analize u velikoj meri zavise od kvaliteta korišćenih podataka, koji su u geologiji i rudarstvu izuzetno promenljive slučajne veličine. Njihova stručna analiza i usvajanje zahtevaju dobro praktično i teorijsko poznavanje spoljašnjih i unutrašnjih faktora koji teško mogu da se predvide u prostoru i vremenu za svako ležište i svaki rudnik ponaosob.
2. Korišćenjem velikog broja promenljivih koje je često teško predvideti u prostorno-vremenskom smislu, postoji rizik od previše prilagođavanja podataka i slabe generalizacije rezultata.
3. Osetljivost na pretpostavke, kao što su normalna raspodela podataka ili nezavisnost promenljivih. Ako su ove pretpostavke pogrešne, rezultati mogu biti pogrešni i obmanjujući.
4. Stručnjaci mogu manipulirati podacima ili selektivno birati podatke kako bi podržali određenu hipotezu ili agendu, što dovodi do pristrasnih rezultata.
5. Promenljivost i osetljivost podataka na promene je izražena, ali je takođe i uobičajena za stohastičke procese u rudarstvu i kao takva je uključena u procenu prihvatljivog rizika.
6. Ljudske greške prilikom unosa, analize ili interpretacije podataka mogu uneti značajne nedostatke u kvantitativnu analizu. Zbog toga je ključno biti svestan ovih ograničenja, biti oprezan prilikom tumačenja kvantitativnih rezultata i oslanjati se na praktično iskustvo kvalitetnih stručnjaka iz oblasti geologije i rudarstva.

Uprkos manama, na osnovu sprovedenog istraživanja može se zaključiti da V-FMECA metoda predstavlja značajan doprinos u oblasti ekološke, socijalne i rudarske bezbednosti, jer omogućava efikasno upravljanje složenim rizicima i podstiče razvoj održivih i sigurnih strategija poslovanja ukoliko se koristi oprezno i sa svesću da mogu biti napravljene potencijalne greške.

## 7. ZAKLJUČAK

Istraživanje predstavljeno u ovoj disertaciji je fokusirano na razvoj i primenu modifikovanog modela za upravljanje ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji ležišta mineralnih sirovina. Kroz integrisani pristup koji kombinuje inženjering, ekosistem interakcije životne sredine i površinskog kopa i principe upravljanja rizicima, V-FMECA model za procenu rizika nudi strukturiran i proaktivan okvir za identifikaciju, analizu i ublažavanje ekoloških rizika povezanih sa rudarskim aktivnostima. Kako rudarska industrija nastavlja da ulazi u sve veći intenzitet rada kako bi zadovoljila rastuće globalne potrebe za mineralnim sirovinama, ključno je da se ove operacije sprovode uz puno uvažavanje njihovih posledica po životnu sredinu.

Predloženi V-FMECA model naglašava značaj rane identifikacije rizika i kontinuiranog praćenja tokom čitavog životnog veka rudnika. Napominje se i značaj prikupljanja podataka ekoloških pokazatelja, kao što su erozija zemljišta, zagađenje voda, nivo prašine i gubitak biodiverziteta, i pokazuje važnost sistematske analize rizika i korišćenje rezultata kao ispomoć za donošenje odluka. Ovaj proces ne samo da povećava preciznost predviđanja rizika, već i poboljšava efikasnost mera ublažavanja omogućavajući pravovremene intervencije.

Jedna od ključnih prednosti modela prikazanog u ovoj disertaciji je njegova prilagodljivost. Može se adaptirati prema specifičnim geološkim, klimatskim i ekološkim uslovima rudarskog lokaliteta, čineći ga korisnim višenamenskim alatom, bez obzira na mineralnu sirovinu koja se eksploatiše. Ovo omogućava rukovodstvu rudnika da prioritarno deluje u skladu sa nivoima rizika i ekološkom osetljivošću, što na kraju podržava održivo donošenje odluka i efikasnu eksploataciju.

Pored toga, predloženi V-FMECA model u svoj okvir uključuje i ekonomsku evaluaciju, prepoznajući da zaštita životne sredine mora biti usklađena sa operativnom izvodljivošću. Analize troškova koriste se za upoređivanje finansijskih implikacija predloženih mera ublažavanja posmatranih rizika. Ovakav pristup pomaže u opravdanju ulaganja u životnu sredinu i podržava transparentnu komunikaciju sa zainteresovanim stranama, uključujući regulatorna tela, lokalne zajednice i investitore.

Ideja za formiranje novog modifikovanog V-FMECA modela je proistekla iz činjenice da su konvencionalne metode za procenu rizika FMEA i FMECA predmet mnogih kritika naučne javnosti, posebno u vezi sa standardnom primenjenom subjektivnom procedurom relativnog rangiranja rizika i prioritizacije putem RPN broja. Kvantitativna metoda za procenu rizika V-FMEA (Vrednosna analiza režima, efekata i kritičnosti otkaza) je modifikovana u poređenju sa konvencionalnom metodom FMEA kada je u pitanju analiza rizika. U modifikovanoj metodi je predložena vrednost prioriteta rizika (RPV). V-FMECA se zasniva na teoriji pouzdanosti i održava jednostavnost FMEA metode, dok eliminiše kritikovane nedostatke konvencionalnog RPN-a. Istovremeno je u skladu sa svetskim standardima o proceni rizika.

Implementacija ovog modela u četiri studije slučaja pokazala je njegovu praktičnu vrednost. U svakom scenariju, model je omogućio smanjenje ukupnog ekološkog rizika kroz ciljane intervencije. Ovi rezultati naglašavaju sposobnost modela da omogući konkretna poboljšanja kompleksnog ekosistema površinskog kopa i njegovim odnosom sa radnom i životnom sredinom.

V-FMECA je primenjen na četiri studije slučaja radi prikaza adaptacije različitim vrstama rizika i različitim površinskim kopovima:

- Slučaj poplavljenе rudarske opreme na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje,
- Otkaz generalne kosine na površinskom kopu Polje E,
- Rizici rehabilitacije odlagališta Kostolačkog basena uglja,
- Rizici površinskog odvodnjavanja na površinskom kopu Drmno.

Model primenjen na havariju koja je nastala nakon ekstremnih padavina na površinskom kopu Tamnava-Zapadno polje dokazao je kroz detaljnu procenu tehničkih rizika i nekontrolisanih i kontrolisanih ekoloških rizika da je stručni tim doneo ispravnu odluku pri odabiru opcije za sanaciju kopa i revitalizaciju opreme, kao i da je važno uzeti ozbiljne vremenske neprilike u obzir pri planiranju sistema odvodnjavanja.

U okviru analize pouzdanog rada površinskih kopova kao ekosistema, metoda procene rizika V-FMEA je efikasno primenjena na određivanje rizika od otkaza nagiba generalne kosine površinskog kopa uglja Polje E. Dve opcije su analizirane za četiri odabrana važna moguća uzroka. Verovatnoća otkaza je izračunata uz uspostavljenu prihvatljivu maksimalnu verovatnoću loma kosine i sadašnju vrednost posledica/troškova potpune sanacije ugla nagiba kosine. Na taj način, kada se identifikuju potencijalne tačke otkaza, mogu se preduzeti preventivne i korektivne mere kako bi se oni eliminisali ili kako bi se kontinuirano smanjivala njihova moguća pojava.

Analiza rizika rehabilitacije spoljašnjih i unutrašnjih odlagališta površinskih kopova Ćirikovac, Klenovnik i Drmno u Kostolačkom basenu uglja pokazala je procenu pouzdanosti realizacije tehničkih rešenja, kao i verifikaciju geomehaničke stabilnosti terena pomoću eko-kontrolnog Markovljevog modela, što omogućava dinamičko modelovanje i kontrolu stanja sistema.

Verifikacija i validacija modela je takođe izvršena na primeru procene eksternih i internih ekoloških rizika procesa površinskog odvodnjavanja površinskog kopa Drmno, sa sistemom koji obuhvata kanale za odvodnjavanje, taložnike, vodosabirnike, pumpne stanice i odgovarajući broj cevovoda, sa konstantnim tehničkim i prostornim promenama. Rezultati preliminarne analize potvrđuju mogućnosti postavljene metode i otvaraju prostor za detaljno sagledavanje uticaja ekoloških rizika na sve procese površinske eksploatacije.

Zaključno, model razvijen kroz ovo istraživanje predstavlja napredak u upravljanju ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji. On pruža naučno utemeljen, prilagodljiv i operativno relevantan okvir koji podržava odgovorno rudarstvo. Podstiče kulturu ekološke odgovornosti i doprinosi dugoročnoj održivosti rudarskog sektora. Model poštuje stalna unapređenja, promovise inovacije u tehnologijama zaštite životne sredine i potvrđuje potrebu za integracijom ekoloških aspekata u samu srž planiranja i realizacije svih rudarskih projekata.

Buduća istraživanja mogla bi nadograditi ovu osnovu uvođenjem tehnologija za prikupljanje podataka u realnom vremenu, kako bi se dodatno poboljšala sposobnost predviđanja i brze analize. Iako je za potrebe iterativne analize rizika u ovom doktoratu korišćen jednostavni Excel format, svakako je potrebno razviti kompleksni softver koji bi omogućio još lakše korišćenje modela i obezbediti efikasnu kontrolu rizika.

Ova metoda određivanja i upravljanja verovatnoćama rizika treba da se koristi zbog serijske povezanosti svih rizika koji ugrožavaju funkcionalnost i pouzdanost sistema, a ne samo jedne nezavisne mogućnosti otkaza. Savladavanje ovakve procene rizika omogućava objektivno donošenje odluka uz pomoć neto sadašnje vrednosti i proračuna verovatnoća otkaza u realnim situacijama u kojima se rudarske kompanije suočavaju sa mnogobrojnim rizicima istovremeno.

Treba napomenuti da uspešno upravljanje ekološkim rizicima u površinskoj eksploataciji ne zavisi samo od tehničke ispravnosti modela kao što je model koji je predstavljen u ovoj disertaciji, već i od posvećenosti rudarskih kompanija i regulatornih tela da dosledno primenjuju najviše ekološke standarde sa maksimalnim međusobnim nivoom saradnje. Ova disertacija pruža jasan put ka ostvarenju tog cilja i naglašava ključnu ulogu integrisanih, na dokazima zasnovanih pristupa upravljanja rizicima na površinskim kopovima radi postizanja ravnoteže između održive eksploatacije nezamenjivih i neobnovljivih resursa i zaštite životne sredine.

## LITERATURA

- [1] ISO, 2018. *ISO 31000:2018*.
- [2] Aven, T., 2016. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), pp.1-13. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>.
- [3] Lalonde, C. and Boiral, O., 2012. Managing risks through ISO 31000: A critical analysis. *Risk Management*, 14(4), pp.272–300.
- [4] NASA, 2010. *Risk-Informed Decision Making Handbook*.
- [5] Haavik, T.K., Kongsvik, T. and Vigen, M., 2023. Risk in transit: A case study of the introduction of a new risk definition for risk management in the Norwegian petroleum industry. *Journal of Risk Research*, 26(11), pp.1244-1262. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/13669877.2023.2270663>.
- [6] Aven, T., 2015. Implications of Black Swans to the Foundations and Practice of Risk Assessment and Management. *Reliability Engineering & System Safety*, 134, pp.83-91. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.10.004>.
- [7] De Campos, L.M., Huete, J.F. and Moral, S., 1994. Probability intervals: a tool for uncertain reasoning. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2(2), pp.167-196.
- [8] De Campos, L., Huete, J. and Moral, S., 2006. Uncertainty management using probability intervals. *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 116-130. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/BFb0035950>.
- [9] Nutter, J.T., 1987. Uncertainty and Probability. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- [10] Wellmer, F.W. and Becker-Platen, J., 2002. Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: A review. *International Journal of Earth Sciences*, 91(4), pp.723–745. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s00531-002-0267-x>.
- [11] Sovacool, B.K., et al., 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, 367(6473), pp.30-33. Dostupno na: <https://doi.org/10.1126/science.aaz6003>.
- [12] Pell, R., Tijsseling, L., Goodenough, K. et al., 2021. Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(12), pp.665–679. Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00211-6>.
- [13] Bristow, M., 2020. Partnerships can manage risk – COVID 19 showed how. *World Risk Report 2020*.
- [14] Pavlovic, N., Ignjatovic, D., Pavlovic, V., 2018. Control of social and environmental risks during opencast lignite mining. *14th International Symposium of Continuous Surface Mining*, ISCSM2018.
- [15] Bárdossy, G. and Fodor, J., 2001. Traditional and new ways to handle uncertainty in geology. *Natural Resources Research*, 10(2), pp.179–187. Dostupno na: <https://doi.org/10.1023/A:1012513107364>.
- [16] Mann, C.J., 1993. Uncertainty in geology. In: J.C. Davis and U.C. Herzfeld, eds. *Computers in Geology—25 Years of Progress*. Oxford: Oxford University Press, pp.241-254.
- [17] Randle, C.H., Bond, C.E., Lark, R.M. and Monaghan, A.A., 2019. Uncertainty in geological interpretations: Effectiveness of expert elicitations. *Geosphere*, 15(1), pp.108–118. Dostupno na: <https://doi.org/10.1130/GES01586.1>.
- [18] Berry, M., 2002. Mineral resource and ore reserve estimation the AUSIMM guide to good practice. *Monograph 30*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp.585-592.
- [19] Fodor, J. and Bárdossy, G., 2001. Uncertainty and risk: Mathematical concepts and some geological applications. *Rudarsko-geološki-naftni zbornik*, 13, pp.45-59.

- [20] Nurgaliev, R.Z., et al., 2019. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 378(1), 012117.
- [21] Soleymani Shishvan, M. and Benndorf, J., 2016. The effect of geological uncertainty on achieving short-term targets: A quantitative approach using stochastic process simulation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(3), pp.259-264. Dostupno na: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n3a7>.
- [22] Dominy, S., 2007. Sampling - A critical component to gold mining project evaluation. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, pp.89–96.
- [23] Pérez-Díaz, L., Alcalde, J., and Bond, C.E., 2020. Introduction: Handling uncertainty in the geosciences: Identification, mitigation, and communication. *Solid Earth*, 11, pp.889–897. Dostupno na: <https://doi.org/10.5194/se-11-889-2020>.
- [24] Charles, T., Guéméné, J.M., Corre, B., Vincent, G., and Dubrule, O., 2001. Experience with the quantification of subsurface uncertainties. *Society of Petroleum Engineers (SPE) Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia, pp.1–10.
- [25] Sadykov, R. and Mikhaylov, A., 2015. Management of initial data uncertainties in reservoir simulation. *Society of Petroleum Engineers, SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, Russia, pp.1–19.
- [26] Jessell, M., Pakyuz-Charrier, E., Lindsay, M., Giraud, J., and de Kemp, E., 2018. Assessing and mitigating uncertainty in three-dimensional geologic models in contrasting geologic scenarios. *Metals, Minerals, and Society*, SEG – Society of Economic Geologists. Dostupno na: <https://doi.org/10.5382/SP.21.04>.
- [27] World Risk Report feat. MineHutte ratings. 2024. Mining Journal Intelligence.
- [28] Zakon o rudarstvu i geološkim istraživanjima, Službeni glasnik RS, br. 101/2015-3, 95/2018-267 (dr. zakon), 40/2021-45. Dostupno na: <https://arhiva.mre.gov.rs/doc/geologija-rudarstvo/zakon%20o%20rudarstvu10.12.pdf>
- [29] 2020 CIM Guidance on Commodity Pricing and Other Issues related to Mineral Resource and Mineral Reserve Estimation and Reporting, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum
- [30] What is investment risk? Start with the basics, <https://www.mintos.com/academy/whats-investment-risk-start-with-the-basics/>
- [31] Papp, J.F., Bray, E.L., Edelstein, D.L., Fenton, M.D., Guberman, D.E., Hedrick, J.B., Jorgenson, J.D., Kuck, P.H., Shedd, K.B., and Tolcin, A.C., 2008. Factors that influence the price of Al, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Rare Earth Elements, and Zn: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1356, 61 p.
- [32] Brennan, M.J. and Schwartz, E.S., 1985. Evaluating natural resource investments. *The Journal of Business*, 58(2), pp. 135–157. [online] Dostupno na: <http://www.jstor.org/stable/2352967>
- [33] Bierman, Jr., H. and Smidt, S., 2006. *The Capital Budgeting Decision: Economic Analysis of Investment Projects* (1st ed.). Routledge. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.4324/9780203715512>
- [34] Tapia, C., Saydam, S., Coulton, J. and Sammut, C., 2017. Alternative techniques for forecasting mineral commodity prices. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28, pp. 10.1016/j.ijmst.2017.09.001.
- [35] Frolova, V., Dolina, O. and Shpilkina, T., 2019. Investment risk management at mining enterprises. *E3S Web of Conferences*, 105, p. 01054. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501054>
- [36] Snowden, D., Glacken, I. and Noppe, M., 2002. Dealing with demands of technical variability and uncertainty along the mine value chain. *Value Tracking Symposium*, Brisbane, Australia.
- [37] Lane, G., Davis, M., McLean, E. and Fleay, J., 2007. Performance testing — When, what and how? *Project Evaluation Conference*, Melbourne, Australia.
- [38] Smith, M., Guzman, R. and Botin, J., 2011. A methodological model to assist on the optimization and risk management of mining investment decisions. *Dyna*, 78(221-226).

- [39] Hebblewhite, B.K., 2007. Management of geotechnical risks in mining projects. *School of Mining Engineering, The University of New South Wales*, Sydney, NSW, Australia.
- [40] Morley, A., 2007. Evaluation of exploration projects. *Project Evaluation Conference*, Melbourne, Australia.
- [41] Danihelka, P., 2007. Tailing dams risk analysis and management. *UNECE Workshop on TDS*, Yerevan, Armenia.
- [42] Navigating the ESG compliance landscape, 2023. *Mining Journal*, Aspermont Media, 1 Poultry, London, EC2R 8EJ, UK.
- [43] McCarthy, P.L., 2006. Mineral resource and ore reserve estimation: The AUSIMM guide to good practice. *Monograph 30*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp.13-18.
- [44] Guarnera, B.J., 1997. Technical flaws in bankable documents. *Assaying and Reporting Standards Conference*, Singapore.
- [45] Arango, M.D., Vergara, C. and Gaviria, H., 2010. Modelización difusa para la planificación agregada de la producción en ambientes de incertidumbre. *Dyna. Journal of Mines Faculty*, National University of Colombia, Edición 162, pp.397-409.
- [46] Management Mania, 2020. Technical and technological risks. [online] Dostupno na: <https://managementmania.com/en/technical-technological-risks>
- [47] NASA. *Technical risk management*. Dostupno na: <https://www.nasa.gov/reference/6-4-technical-risk-management/#hds-sidebar-nav-1>.
- [48] Abbasi, S., 2018. Defining safety hazards & risks in mining industry: A case-study in United States. *Journal of Safety Research*, 2.
- [49] Tian, J., Wang, Y., Gao, S., 2022. Analysis of mining-related injuries in Chinese coal mines and related risk factors: A statistical research study based on a meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16249). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/ijerph192316249>.
- [50] The 10 most dangerous jobs in the world. Dostupno na: <https://trdsf.com/blogs/news/the-10-most-dangerous-jobs-in-the-world>.
- [51] The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). *Mining Facts 2010*. Dostupno na: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/statistics/factsheets/miningfacts2010.html>.
- [52] de Jager, K., 2018. Safety – A business imperative. *International Journal of Georesources and Environment*, 4(3), pp.16.
- [53] Kecojevic, V., Nor, Z., Komljenovic, D., Groves, W., 2008. Risk assessment for belt conveyor-related fatal incidents in the US mining industry. *Bulk Solids & Powder Science & Technology*, 3, pp.63-73.
- [54] Kalenga, J.N., 2022. Estimating the injury rates and causes of fatalities in the Japanese mining industry, 1924–2014. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 28(1), pp.107-117. Dostupno na: <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1732115>.
- [55] Kabanov, E.I., Tumanov, M.V., Smetanin, V.S., Romanov, K.V., 2023. An innovative approach to injury prevention in mining companies through human factor management. *Journal of Mining Institute*, 263, pp.774-784.
- [56] Ajith, M.M., Ghosh, A.K., Jansz, J., 2021. Contributing effects of individual characteristics, behavioural and job-related factors on occurrence of mining-related injuries: A systematic review. *Work*, 71, pp.1–31.
- [57] Naeini, S.A.B., Badri, A., 2024. Identification and categorization of hazards in the mining industry: A systematic review of the literature. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 15(1), pp.1–19.
- [58] Eurostat, 2022. *HSW\_N2\_01* and *HSW\_N2\_02*. Dostupno na: [https://doi.org/10.2908/HSW\\_N2\\_01](https://doi.org/10.2908/HSW_N2_01) and [https://doi.org/10.2908/HSW\\_N2\\_02](https://doi.org/10.2908/HSW_N2_02).

- [59] SRPS ISO 14001, 2015. *Environmental Management Systems — Requirements with guidance for use*. Dostupno na: <https://www.iso.org/standard/60857.html>.
- [60] EBRD, 2014. *Environmental and Social Risk Categorisation List – Revised*. European Bank for Reconstruction and Development.
- [61] Social and environmental impacts of mining activities in the EU, 2022. *Policy Department for Citizens' Rights and Constitutional Affairs Directorate-General for Internal Policies PE 729.156*. Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/committees/en/ambient/documents>.
- [62] Kauppila, P., Räisänen, M.L. and Myllyoja, S., 2011. Best environmental practices in metal ore mining. *Finnish Environment*, 29, pp.1–219.
- [63] Zhang, J., Zhang, J., Wu, C., Zhang, Y., Guo, M., Li, H., Wang, R., 2023. Comprehensive quantitative evaluation of the future mining: A comparison of socio-economic benefits and eco-environmental impacts. *Ore Geology Reviews*, 162, p.105727. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105727>.
- [64] Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs, 2010. *Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW)*, Eugene OR 97403. ISBN 978-0-9821214-36.
- [65] Cârlig, E.D., Sluser, B., Macoveanu, M., 2008. Quantification of environmental impact and risk induced by industrial activities on groundwater quality: Case study Cordun - Roman area, Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7, pp.791-803.
- [66] Carmo, F., Lanchotti, A., Kamino, L., 2020. Mining waste challenges: Environmental risks of gigatons of mud, dust and sediment in megadiverse regions in Brazil. *Sustainability*, 12(208466). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/su12208466>.
- [67] Loupasakis, C., Angelitsa, V., Rozos, D., Spanou, N., 2014. Mining geohazards—Land subsidence caused by the dewatering of opencast coal mines: The case study of the Amyntaio coal mine, Florina, Greece. *Natural Hazards*, 70, pp. 10. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0837-1>.
- [68] Coelho, P., Silva, S., Roma-Torres, J., Costa, C., Henriques, A., Teixeira, J.P., Gomes, M.J., Mayan, O., 2007. Health impact of living near an abandoned mine - Case study: Jales Mines. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 210, pp.399-402. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.01.004>.
- [69] Strzałkowski, P., 2019. Some remarks on impact of mining based on an example of building deformation and damage caused by mining in conditions of Upper Silesian Coal Basin. *Pure and Applied Geophysics*, 176, pp.2595-2605. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02127-1>.
- [70] Bai, E., et al., 2023. Green coal mining under buildings by overburden grout injection for coalmine sustainable development of central China. *Heliyon*, 9(8), e18965. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18965>.
- [71] The Electric Mine. *Mining Magazine*. Dostupno na: <https://www.miningmagazine.com>.
- [72] ESG: Unearthing Prosperity, 2024. *Mining Magazine*. Dostupno na: <https://www.miningmagazine.com>.
- [73] Liu, X., Jing, M. and Bai, Z., 2022. Heavy metal concentrations of soil, rock, and coal gangue in the geological profile of a large open-pit coal mine in China. *Sustainability*, 14(1020). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/su14021020>.
- [74] Bhardwaj, S., Soni, R., Gupta, S., Shukla, D., 2020. Mercury, arsenic, lead and cadmium in waters of the Singrauli coal mining and power plants industrial zone, Central East India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8225-2>.
- [75] Sawut, R., Kasim, N., Abliz, A., Hu, L., Yalkun, A., Maihemuti, B. and Qingdong, S., 2018. Possibility of optimized indices for the assessment of heavy metal contents in soil around an open pit coal mine area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, pp.14–25.

- [76] Akbar, W., Rahim, H., Irfan, M., Sehrish, A. and Mudassir, M., 2023. Assessment of heavy metal distribution and bioaccumulation in soil and plants near coal mining areas: implications for environmental pollution and health risks. *Environmental Monitoring and Assessment*. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12258-7>.
- [77] Wang, Y., Wu, X., He, S., et al., 2021. Eco-environmental assessment model of the mining area in Gongyi, China. *Scientific Reports*, 11(17549). Dostupno na: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96625-9>.
- [78] Li, H., Wang, Q., Zhang, C., Su, W., Ma, Y., Zhong, Q., Xiao, E., Xia, F., Zheng, G. and Xiao, T., 2024. Geochemical distribution and environmental risks of radionuclides in soils and sediments runoff of a uranium mining area in South China. *Toxics*, 12(95). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/toxics12010095>.
- [79] Cacciuttolo, C., Cano, D. and Custodio, M., 2023. Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(462). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>.
- [80] Corzo, A. and Gamboa, N., 2018. Environmental impact of mining liabilities in water resources of Parac micro-watershed, San Mateo Huanchor district, Peru. *Environmental Development and Sustainability*, 20(939–961).
- [81] Rubinos, D.A., Óscar, J., Forghani, G., Edraki, M. and Kelm, U., 2021. Geochemical stability of potentially toxic elements in porphyry copper-mine tailings from Chile as linked to ecological and human health risks assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(57499–57529).
- [82] Land Rehabilitation Society of Southern Africa, Coaltech and Minerals Council of South Africa, 2018. *Land Rehabilitation Guidelines for Surface Coal Mines*.
- [83] Drazen, J., et al., 2020. Opinion: Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(202011914). Dostupno na: <https://doi.org/10.1073/pnas.2011914117>.
- [84] Zhang, J., Zhang, J., Deng, Y., Wu, C., Hua Li, Zhanhui Qing, Jinxiang Li, Wei Zhang, 2023. Quantitative evaluation of ecological and environmental impacts caused by future mining. *Ore Geology Reviews*, 162, p.105672. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105672>.
- [85] Yang, H., et al., 2018. Revealing pathways from payments for ecosystem services to socioeconomic outcomes. *Science Advances*, 4(eaao6652). Dostupno na: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6652>.
- [86] Brereton, D. and Parmenter, J., 2006. Water, communities and mineral resource development: Understanding the risks and opportunities. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*.
- [87] Anglo American, 2014. *Social Way*. Anglo American Services UK Ltd.
- [88] Kemp, D., et al., 2016. Differentiated social risk: Rebound dynamics and sustainability performance in mining. *Resources Policy*, 50, pp.19–26. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.08.004>.
- [89] Mancini, L. and Sala, S., 2018. Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks. *Resources Policy*, 57. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.002>.
- [90] Swann Group. *Mining and Society*.
- [91] Suopajärvi, L., Beland Lindahl, K., Eerola, T., et al., 2023. Social aspects of business risk in the mineral industry—political, reputational, and local acceptability risks facing mineral exploration and mining. *Mineral Economics*, 36, pp.321–331. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00345-z>.
- [92] Franken, G. and Schütte, P., 2022. Current trends in addressing environmental and social risks in mining and mineral supply chains by regulatory and voluntary approaches.

- Mineral Economics*, 35, pp.653–671. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00309-3>.
- [93] ISO, 2021. *ISO 26000 Guidance on Social Responsibility*.
- [94] Franks, D., 2011. Management of the social impacts of mining. *SME Mining Engineering Handbook*, pp.1817–1825.
- [95] BSR, 2011. *Adapting to Climate Change: A Guide for the Mining Industry*.
- [96] Task Force on Climate-related Financial Disclosures, 2017. *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures, Final Report*.
- [97] Canadian Securities Administrators, 2019. *CSA Staff Notice 51-358 Reporting of Climate Change-related Risks*.
- [98] Iqbal, M.S., Dahri, Z.H., Querner, E.P., Khan, A., and Hofstra, N., 2018. Impact of climate change on flood frequency and intensity in the Kabul River Basin. *Geosciences*, 8(114). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/geosciences8040114>.
- [99] Masaru, M., 2014. Flood risk impact factor for comparatively evaluating the main causes that contribute to flood risk in urban drainage areas. *Water*, 2014.
- [100] Pavlović, N., Šubaranović, T. and Ignjatović, D., 2022. Uticaj ekstremnih procesa na rizike površinske eksploatacije. *Zbornik 15. Međunarodne konferencije OMC 2022*, ISBN 978-86-83497-29-4, Zlatibor, Serbia.
- [101] Kuter, N., 2013. Reclamation of degraded landscapes due to opencast mining. In: *Advances in Landscape Architecture*. IntechOpen, Rijeka. Dostupno na: <https://doi.org/10.5772/55796>.
- [102] International Organization for Standardization, 2021. *International Standard ISO 21795-1:2021, First Edition*.
- [103] Finucane, S.J. and Beckett, K., 2024. Environmental, social and governance influences on closure cost provisioning and why we need a global standard for reporting closure financial liability. In: A.B. Fourie, M. Tibbett & G. Boggs, eds. *Mine Closure 2024: Proceedings of the 17th International Conference on Mine Closure*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp.107–120. Dostupno na: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2415\\_06](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2415_06).
- [104] Mining Magazine. *Why an Early, Integrated Approach to Mine Closure?*. Dostupno na: <https://www.miningmagazine.com/partners/partner-content/1458904/integrated-approach-closure>.
- [105] Cui, C.Q., Wang, B., Zhao, Y.X., et al., 2020. Risk management for mine closure: A cloud model and hybrid semi-quantitative decision method. *International Journal of Mineral Metallurgical Materials*, 27, pp.1021–1035. Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2002-7>.
- [106] Cacciuttolo, C. and Atencio, E., 2023. In-pit disposal of mine tailings for a sustainable mine closure: A responsible alternative to develop long-term green mining solutions. *Sustainability*, 15(6481). Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/su15086481>.
- [107] O'Callaghan, T. and Vivoda, V., 2015. Problems of regulatory governance in the mining sector in Asia. *Transnational Corporations*, 22, pp.31–57. Dostupno na: <https://doi.org/10.18356/34aec3e7-en>.
- [108] International Council on Mining and Metals. *Mining and Society*.
- [109] Nomkhosi, R. and Nelson, C., 2024. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets. *Resources Policy*, 91, p.104887. Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104887>.
- [110] Frolova, V., Glinkina, O. and Shpilkina, T., 2021. Financial risks and their management in the mining industry. *E3S Web of Conferences*, 278, p. 03041. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127803041>
- [111] Park, H.M., 2012. Mining project evaluation process for investment decisions. Department of Mining Engineering, The University of Utah.

- [112] Pavlović, V., Ignjatović, D. and Šubaranović, T., 2017. Upravljanje promenama rudarskih projekata. *Zbornik Međunarodne konferencije COAL 2017*, Zlatibor, Srbija.
- [113] Pavlović, N., Šubaranović, T., Ignjatović, D. and Pavlović, V., 2023. Usklađenost FMEA i V-FMEA metoda upravljanja rudarskim rizicima u odnosu na ISO 31000:2018 standard. *Zbornik 11. Međunarodne konferencije Coal And Critical Minerals 2023*, Zlatibor, Srbija.
- [114] ISO, 2019. *ISO/IEC 31010:2019*. Risk management – Risk assessment techniques. International Organization for Standardization.
- [115] Tubis, A., Werbińska-Wojciechowska, S. and Wroblewski, A., 2020. Risk assessment methods in mining industry—A systematic review. *Applied Sciences*, 10(15), p. 5172. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/app10155172>
- [116] Evotix, 2024. 5 Types of risk assessments & how to use them. *Evotix*. [online] Dostupno na: <https://www.evotix.com/resources/blog/5-types-of-risk-assessment-how-to-use-them>
- [117] Paredes, R., 2024. The different types of risk assessment. *SafetyCulture*. [online] Dostupno na: <https://safetyculture.com/topics/risk-assessment/types-of-risk-assessment/>
- [118] Schmittling, R. and Munns, A., 2010. Performing a security risk assessment. *ISACA® Journal*, vol. 1. [online] Dostupno na: <https://www.isaca.org/resources/isaca-journal/issues>
- [119] Anderson, R.D., Sweeney, J.D. and Williams, A.T., 2003. *Management Science*. Thomson, Ohio, pp. 567-577.
- [120] Pavlović, V., Pavlović, V. and Jović, V., 2006. Managing ecological processes in surface mining. *ISCSM 2006 proceedings*, Aachen, Germany.
- [121] Raschel, T. and Knights, P., 2012. The case for quantitative risk analysis in the mining industry. *Queensland Mining Industry Health and Safety Conference 2012 proceedings*.
- [122] Slovic, P., Fischhoff, B. and Lichtenstein, S., 1979. Rating the risks. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 21(5), pp. 14-39. [online] Dostupno na: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00139157.1979.9933091>
- [123] Mosleh, A., Bier, V.M. and Apostolakis, G., 1988. A critique of current practice for the use of expert opinions in probabilistic risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, 20(1), pp. 63-85.
- [124] Pavlović, N., Pavlović, V. and Ignjatović, D., 2019. Assessment of social and environmental risks on opencast coal mines. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 10(2/3/4). [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1504/IJMME.2019.104449>
- [125] Pavlović, V., Ignjatović, D. and Šubaranović, T., 2016. Implementation of the rehabilitation operational strategy for the flooded opencast coal mine Tamnava-West Field. *IMWA2016 proceedings*, pp. 578-585, Leipzig, Germany.
- [126] Hall, H., 2020. Evaluating risks using qualitative risk analysis. *Project Risk Coach*. [online] Dostupno na: <https://projectriskcoach.com/evaluating-risks-using-qualitative-risk-analysis/>
- [127] Mendes, A. and Ribeiro, J.L., 2015. A study of the quantitative methods that support RCM operation. *2015 IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 64-71. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1109/RAMS.2015.7105162>
- [128] Jardine, A.K.S. and Tsang, A.H.C., 2005. *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. CRC Press. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1201/9781420044614>
- [129] IEC, 2009. *IEC 60300-3-11:2009 - Dependability management-Part 3-11: Application guide - Reliability centred maintenance*. International Electrotechnical Commission.
- [130] Petrović, Z., Radičević, B., Vukićević, M. and Bjelić, M., 2009. Klasifikacija aktivnosti održavanja na bazi RCM-a na primeru pumpnog postrojenja. *IMK-14, tom 15, izd. 1/2=30/31*, pp. 185–201. Dostupno na: <http://scindeks.nb.rs/article.aspx?artid=0354-68290902185P>

- [131] IEC, 2018. *IEC 60812:2018 - Failure modes and effects analysis (FMEA) and failure modes and effects and criticality analysis (FMECA)*. International Electrotechnical Commission.
- [132] Pavlović, N., Ivoš, V. and Korakianiti, M., 2018. Application of FMEA analysis method and evaluation of sociological and ecological risks of sustainable development of coal exploitation in the open pit Radljevo in the Kolubara Basin. *Proceedings of the 8th International Conference OMC 2018*, ISBN 978-86-83497-25-6, Zlatibor, Serbia.
- [133] TWI Ltd, 2025. FMECA vs FMEA (What is the difference between them?). *TWI Ltd*. [online] Dostupno na: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/fmece-vs-fmea>
- [134] Kouassi, K., Assie, K., Thieblessou, M. and Yao, K., 2024. Safety risks and environmental implications associated with Lauzoua manganese mining activities (South-west of Côte d'Ivoire). *SSRN*. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4912803>
- [135] Liu, H.C., Liu, L. and Liu, N., 2013. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), pp. 828-838.
- [136] Pavlović, V. and Šubaranović, T., 2012. Pouzdanost, optimizacija i upravljanje sistemima odvodnjavanja površinskih kopova. *Monografija*, ISBN: 978-86-7352-240-1, COBISS.SR-ID 192077836, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
- [137] Todinov, M.T., 2006. *Risk-Based Reliability Analysis and Generic Principles for Risk Reduction*. Elsevier Science & Technology Books.
- [138] Pavlović, N., Petrović, B., Šubaranović, T. and Janković, I., 2022. Optimizacija uglja nagiba generalne kosine unutrašnjeg odlagališta površinskog kopa Tamnava-Zapad. *Zbornik XV međunarodne konferencije OMC 2022*, ISBN 978-86-83497-29-4, Zlatibor, Serbia.
- [139] Pavlović, N., 2024. Model upravljanja ekološkim rizicima površinske eksploatacije. *Zbornik Međunarodne konferencije OMC 2024*, Zlatibor, Srbija.
- [140] Environmental Impact Assessment Directive, 2014. Directive 2014/52/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 amending Directive 2011/92/EU on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. *OJ L 124*, 25.4.2014.
- [141] Environmental Impact Assessment Training Manual, 2016. *International Institute for Sustainable Development*.
- [142] EPA EcoBox, 2025. *A Toolbox for Ecological Risk Assessors*. [online] Dostupno na: <https://www.epa.gov/ecobox>
- [143] Ecological Risk Assessment Guidance 2020. *Canadian Council of Ministers of the Environment*.
- [144] Pavlović, N., et al., 2022. Risk assessment of flooded equipment revitalization on opencast coal mine Tamnava West Field. *Thermal Science*, 26(3). [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.2298/TSCI210615240P>
- [145] Badri, A., Nadeau, S. and Gbodossou, A., 2012. A mining project is a field of risks: A systematic and preliminary portrait of mining risks. *International Journal of Safety and Security Engineering*.
- [146] Claassen, M., Strydom, W.F., Murray, K. and Jooste, S., 2001. *Ecological Risk Assessment Guidelines*, WRC Report Number TT 151/01, ISBN: 1 86845 721 4, Republic of South Africa.
- [147] Jang, H., Lee, M., Hong, S. and Kwon, H., 2016. Risk evaluation based on the hierarchical time delay model in FMEA. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 44(2), pp. 373-388. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.7469/JKSQM.2016.44.2.373>
- [148] Hyett, D., 2010. Environmental risk assessment in environmental impact assessment - optional or mandatory? *IAlA10 Conference Proceedings*, The Role of Impact Assessment

- in Transitioning to the Green Economy; 30th Annual Meeting of the International Association for Impact Assessment, Geneva.
- [149] Flage, R., Aven, T., Zio, E. and Baraldi, P., 2014. Concerns, challenges, and directions of development for the issue of representing uncertainty in risk assessment. *Risk Analysis*, 34(7), pp. 1196-1207. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1111/risa.12247>
- [150] Pavlovic, N., Petrovic, B. and Subaranovic, T., 2023. Evaluation methodology of open-pit mine overall slope failure risks. *Materials Proceedings*, 15, p. 11. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/materproc2023015011>
- [151] CAST–Software Intelligence for Digital Leaders, 2020. Technical risk. [online] Dostupno na: <https://www.castsoftware.com/glossary/technical-risk>
- [152] Pavlovic, V., 1998. *Continuous Mining Reliability*. Ellis Horwood Limited, Chichester, England.
- [153] Wolstenholme, L.C., 1999. *Reliability Modelling*. Chapman and Hall, London, England.
- [154] Barlow, R., 1998. *Engineering Reliability*, ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability. Philadelphia, US.
- [155] Cox, D.R. and Miller, H.D., 1998. *The Theory of Stochastic Processes*. Chapman and Hall, London, England.
- [156] Subaranovic, T., Ristic, I. and Pavlovic, N., 2018. Sustainable long-term planning of the Kostolac Coal Basin opencast mines closure. *Proceedings of the 12th International Conference on Mine Closure*, 3–7 September 2018, Leipzig, Germany.
- [157] Pavlovic, N., et al., 2022. Internal dump slope stability risk assessment on opencast coal mine Tamnava-West. *X IGC2022*, Varna, 2022.
- [158] Read, L. and Vogel, R., 2015. Reliability, return periods, and risk under nonstationarity. *Water Resources Research*, 51. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.1002/2015WR017089>
- [159] Ozga-Zielinski, B., Adamowski, J. and Ciupak, M., 2018. Applying the theory of reliability to the assessment of hazard, risk, and safety in a hydrologic system: A case study in the Upper Sola River Catchment, Poland. *Water*, 10, p. 723. [online] Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/w10060723>

## Biografija autora

Natalija Pavlović rođena je 5.1.1991. u Beogradu, Republici Srbiji. Završila je Četvrtu gimnaziju u Beogradu i upisala Rudarsko-geološki fakultet 2010. godine, rudarski odsek, smer inženjerstvo za zaštitu životne sredine. Stekla je diplomu inženjera zaštite životne sredine odbranom diplomskog rada na temu *Deponovanje fosfogipsa IHP Elixir Prahovo u obliku suspenzije*, 2014. godine.

Upisala je master studije 2014. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu, smer inženjerstvo za zaštitu životne sredine. Završila je master studije u septembru 2015. godine, i odbranom master rada na temu *Modeliranje uticaja buke sa površinskog kopa Buvač* stekla je titulu master inženjera za zaštitu životne sredine.

Položila je Stručni ispit iz oblasti zaštite životne sredine u rudarstvu 2017. godine. Upisane doktorske studije 2017. godine iz naučne oblasti Rudarsko inženjerstvo i objavljeni radovi su joj omogućili izbor u zvanje istraživača pripravnika na Univerzitetu u Beogradu 2019. godine, i od tada do jula 2021. godine je bila zaposlena kao istraživač u Inovacionom centru Mašinskog fakulteta iz Beograda. Član je radne grupe UNFC-a (*United Nations Framework Classification for Resource*) za klasifikaciju sekundarnih mineralnih sirovina od 2018. godine. Takođe je i ko-koordinator grupe za razvoj članova u međunarodnoj akademskoj organizaciji *Society of Mining Professors*.

Od jula 2021. godine zaposlena je kao stručni saradnik na Univerzitetu u Beogradu, Rudarsko-geološkom fakultetu. Takođe je završila master na modulu Površinska eksploatacija ležišta mineralnih sirovina i stekla diplomu master inženjera rudarstva 2023. godine. Njena oblast istraživanja i stručne teme za buduće inovacije su optimizacija procene rizika na površinskim kopovima mineralnih sirovina, zatvaranje površinskih kopova i rekultivacija. Tokom svoje karijere objavila je 24 naučna i stručna rada, od kojih su 3 objavljena u SCI indeksiranim časopisima kategorije M23, 4 naučna rada kategorije M24, 1 poglavlje u monografiji međunarodnog značaja i 16 radova u celini objavljenih u zbornicima međunarodnih konferencija M30. Prema Scopusu (pristupljeno februara 2025.), ima 2 citata iz 4 dokumenta u Scopusu, sa h-indeksom od 1.

Zahvaljujući objavljenim radovima i prijavljenoj doktorskoj disertaciji, stekla je naučno zvanje istraživač saradnik. Trenutno je i sekretar Katedre za površinsku eksploataciju ležišta mineralnih sirovina Univerziteta u Beogradu, Rudarsko-geološkog fakulteta.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Наталија Павловић

Број индекса: P708/17

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Модел управљања еколошким ризицима на површинским коповима лежишта  
минералних сировина

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, 08.05.2025.

---

# Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Наталија Павловић

Број индекса: P708/17

Студијски програм: Рударско инжењерство

Наслов рада: Модел управљања еколошким ризицима на површинским коповима лежишта минералних сировина

Ментори: проф. др Драган Игњатовић и проф. др Томислав Шубарановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, 08.05.2025.

---

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Модел управљања еколошким ризицима на површинским коповима лежишта  
минералних сировина

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, 08.05.2025.

---

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
  
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
  
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
  
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
  
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
  
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.