

# Požari i eksplozije u podzemnoj eksploataciji

---

**Gelemanović, Filip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:969108>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

**POŽARI I EKSPLOZIJE U PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI**

Diplomski rad

Filip Gelemanović

R223

Zagreb, 2020.

## POŽARI I EKSPLOZIJE PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI

Filip Gelemanović

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

U diplomskom radu su obrađene opasnosti u podzemnoj eksploataciji s naglaskom na požare i eksplozije. Navedeni su svi uzroci požara i eksplozija u rudarstvu, njihova prevencija i svladavanje. Koristeći programe Word i Excel iz Office paketa, statistički su obrađene nesreće u rudarstvu tijekom posljednjih 20 godina. Rezultati statističke obrade su prikazani u obliku dijagrama koji se odnose na smrtno stradale rudare u nesrećama, te uzroke i lokacije tih nesreća. U posljednjih 20 godina je kroz ovaj pregled ustanovljeno 3880 smrtno stradalih rudara, od kojih je najveća većina stradala od požara i eksplozija u ugljenokopima, što čini 3530 žrtava, odnosno 91 % svih stradalih. Postoje mnogi čimbenici koji utječu na sigurnost, te koji mogu biti reducirani, ali nikad u potpunosti eliminirani.

Ključne riječi: opasnosti, podzemna eksploatacija, požari, eksplozije, Office  
Završni rad sadrži: 54 stranice, 1 tablicu, 22 slike, 1 prilog, i 5 referenci.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentor: Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF  
Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF  
Dr. sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Vinko Škrlec, docent RGNF

## FIRES AND EXPLOSIONS IN UNDERGROUND EXPLOITATION

Filip Gelemanović

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

The Master's thesis deals with the dangers of underground exploitation with emphasis on fires and explosions. All causes of fires and explosions in mining, their prevention and control are listed. Using Word and Excel from the Office suite, mining accidents have been statistically analyzed over the last 20 years. The results of the statistical analysis are presented in the form of diagrams relating to the deaths of miners in accidents and the causes and locations of such accidents. Over the past 20 years, this survey has identified 3880 deceased miners, the largest majority of whom have been killed by fires and explosions in coal mines, accounting for 3530 casualties, or 91 % of all casualties. There are many factors that affect security that can be reduced but never completely eliminated.

Keywords: danger, underground exploitation, fire, explosion, Office

Thesis contains: 54 pages, 1 tables, 22 figures, 1 appendixes and 5 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Mario Klanfar, PhD, Associate Professor

Reviewers: Assistant Professor Mario Klanfar, PhD  
Associate Professor Dalibor Kuhinek, PhD  
Assistant Professor Vinko Škrlec, PhD

## SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. OPASNOSTI U PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI .....                | 5  |
| 1.1. Eksplozije .....                                       | 5  |
| 1.2. Respiratorne opasnosti.....                            | 7  |
| 1.3. Plinovi.....   | 7  |
| 1.4. Prašina.....   | 9  |
| 1.5. Fizičke opasnosti .....                                | 10 |
| 1.6. Biološki agensi.....                                   | 12 |
| 1.7. Kemijski agensi .....                                  | 12 |
| 2. POŽARI I EKSPLOZIJE U PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI .....      | 14 |
| 2.1. Vatreni trokut i proces gorenja .....                  | 14 |
| 2.2. Klasifikacija rudarskih požara .....                   | 16 |
| 2.3. Uzroci požara u rudniku .....                          | 16 |
| 2.3.1. Mehanizacija .....                                   | 16 |
| 2.3.2. Električni uređaji.....                              | 17 |
| 2.3.3. Transportne trake .....                              | 18 |
| 2.3.4. Ostali uzroci požara trenjem .....                   | 19 |
| 2.3.5. Eksplozivi .....                                     | 19 |
| 2.3.6. Zavarivanje .....                                    | 19 |
| 2.3.7. Pušenje i sigurnosne svjetiljke.....                 | 20 |
| 2.4. Egzogeni požari .....                                  | 20 |
| 2.4.1. Požari bogati kisikom i gorivim tvarima .....        | 21 |
| 2.4.2. Utjecaj požara na ventilaciju.....                   | 22 |
| 2.4.3. Učinak uzgona (prirodni propuh) .....                | 22 |
| 2.4.4. Metode gašenja egzogenih požara .....                | 24 |
| 2.4.5. Gašenje požara vodom.....                            | 24 |
| 2.4.6. Gašenje požara ekspanirajućom pjenom.....            | 25 |
| 2.4.7. Kontrola putem ventilacije.....                      | 26 |
| 2.4.8. Kontrola tlaka .....                                 | 27 |
| 2.4.9. Okretanje zračnih struja .....                       | 28 |
| 2.5. SAMOZAPALJENJE .....                                   | 29 |
| 2.5.1. Mehanizmi nastanka samozapaljenja u mineralima ..... | 30 |
| 2.5.2. Faze oksidacije.....                                 | 30 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.5.3. | Sposobnost ugljena samozapaljenju .....                               | 31 |
| 2.5.4. | Prevenција nastanka samozapaljenja .....                              | 31 |
| 2.5.5. | Svladavanje samozapaljenja .....                                      | 32 |
| 2.6.   | UPOTREBA PREGRADA I KONTROLE TLAKA U SLUČAJU POŽARA I EKSPLOZIJA..... | 35 |
| 2.7.   | Plinoviti produkti požara (gorenja).....                              | 38 |
| 3.     | EKSPLOZIJE U PODZEMNIM KOPOVIMA .....                                 | 40 |
| 3.1.   | Uzroci eksplozija .....   | 40 |
| 3.1.1. | Eksplozije plinova.....   | 41 |
| 3.1.2. | Eksplozije ugljene prašine .....                                      | 41 |
| 3.1.3. | Eksplozije sulfidne prašine .....                                     | 43 |
| 3.2.   | Suzbijanje eksplozija .....   | 43 |
| 3.2.1. | Upotreba kamene prašine i vodenih barijera .....                      | 44 |
| 3.2.2. | Aktivirajuće barijere i detektori eksplozija.....                     | 46 |
| 4.     | PREGLED POŽARA I EKSPLOZIJA PO RUDNICIMA .....                        | 47 |
| 5.     | ZAKLJUČAK .....   | 53 |
| 6.     | LITERATURA .....  | 54 |

## POPIS SLIKA

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 2-1 | Kemijska eksplozija.....  | 6  |
| Slika 2-2 | Eksplozija električnih ili magnetskih instalacija .....                                 | 6  |
| Slika 2-3 | Eksplozija uzrokovana mehaničkim kvarom.....  | 6  |
| Slika 2-4 | Različiti oblici zračenja i njihovo prodiranje kroz materijale.....                     | 11 |
| Slika 2-5 | GHS piktogrami opasnosti.....   | 14 |
| Slika 3-1 | Vatreni trokut.....   | 15 |
| Slika 3-2 | Primjena pregrada u kontroli štetnih plinova.....                                       | 28 |
| Slika 3-3 | Zona u kojoj je moguća pojava spontanog zapaljenja materijala u zarušenog područja..... | 32 |
| Slika 3-4 | Koncentracija plinova ovisno o temperaturi ugljena.....                                 | 33 |
| Slika 3-5 | Pregrada otporna na eksploziju.....   | 36 |
| Slika 3-6 | Pregrada s oduškom.....   | 37 |
| Slika 4-1 | Eksplozija ugljene prašine u testnoj prostoriji.....                                    | 42 |
| Slika 4-2 | Konstrukcija barijere kamene prašine u hodniku.....                                     | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 4-3 Razmještaj barijera kamene prašine u rudniku.....                          | 45 |
| Slika 4-4 Aktivirajuća barijera za suzbijanje.....                                   | 46 |
| Slika 5-1 Dijagram smrtno stradalih u rudarskim nesrećama.....                       | 48 |
| Slika 5-2 Dijagram smrtno stradalih po uzrocima nesreća.....                         | 48 |
| Slika 5-3 Dijagram smrtno stradalih u pojedinim mineralnim sirovinama.....           | 49 |
| Slika 5-4 Dijagram kretanja broja smrtno stradalih u rudnicima.....                  | 50 |
| Slika 5-5 Dijagram kretanja broja pojavljivanja požara i eksplozija u rudnicima..... | 50 |
| Slika 5-6 Dijagram pojavljivanja požara i eksplozija u rudnicima.....                | 51 |
| Slika 5-7 Dijagram pojavljivanja požara i eksplozija u mineralnim sirovinama.....    | 52 |

## **POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 3-1 Granice zapaljivosti i eksplozivnosti plinova u rudnicima..... | 39 |
|--|----|

## **POPIS PRILOGA**

|   |  |
|---|--|
| Prilog 1. Tablica nesreća u rudnicima tijekom 2000. – 2020. |  |
|---|--|

## UVOD

Opasnosti u podzemnoj eksploataciji od kojih se najviše strahuje su zasigurno požari i eksplozije. Takve opasnosti se ne događaju često, no kao posljedicu imaju velike materijalne gubitke i tragične ishode, opasne po život rudara, ali i trenutno ili trajno oštećenje rezervi mineralnih sirovina. Požari i eksplozije koji se događaju u podzemnom prostoru se razlikuju od površinskih po tome što su za većinu smrti uzrok udisanje otrovnih plinova i dima, točnije ugljičnog monoksida, a ne opekotine i udarni val.

Pojava požara i eksplozija u podzemnoj eksploataciji je i dalje prisutna usprkos razvoju metoda eksploatacije, praćenja utjecaja eksploatacije na okoliš, te kontrole potencijalnih opasnosti. Prema Malcom J. McPhersonu (2009.) je više razloga za to; kao što je porast upotrebe različitih materijala koje su uvedene kroz moderne metode otkopavanja, koje variraju od smola i plastika do tekućih goriva i hidrauličnih ulja. Drugi razlog je sve veće uvođenje mehaniziranih metoda otkopavanja, od kojih mnogi strojevi sadrže zapaljive tekućine i materijale koji mogu proizvesti otrovne pare prilikom zagrijavanja.

Za pojavu opasnosti, kao što su požari i eksplozije, uvelike su zaslužni i prioriteti sigurnosti i zdravlja kod samih rudarskih kompanija i država u kojima se nalaze. Također je pojava tih incidenata povezana povećana u razdobljima kada je visoka cijena minerala i fosilnih goriva. Države koje imaju aktivna istraživanja u području sigurnosti u rudarstvu i u koja se dodatno ulažu sredstva, pridaju veliku pažnju za sigurnost kao i tvrtke koje posluju u tim zemljama.

U ovome radu će biti prikazani uzroci požara i eksplozija u rudnicima, metode njihova svladavanja, te preventivne mjere koje se koriste u rudarstvu. Također, katastrofalne posljedice požara i eksplozija su statistički obrađene kroz pregled nesreća u rudarstvu tijekom bliže povijesti, gledano kroz broj unesrećenih.



## 1. OPASNOSTI U PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI

Svi zaposlenici u rudarstvu, odnosno na podzemnoj eksploataciji, su izloženi brojnim opasnostima, kao što su: otrovni plinovi, urušavanje podzemnih prostorija, padajući dijelovi stijene, gorski udari, požari i eksplozije. Postoje mnogi čimbenici koji utječu na sigurnost radnika i rizici koji mogu biti reducirani, ali nikad u potpunosti eliminirani. Radno okruženje u rudniku mora biti opremljeno sigurnosnim uređajima koji u većini slučajeva spašavaju živote, svaki radnik koji ulazi u rudnik mora biti educiran o potencijalnim opasnostima, a sigurnosni uvjeti na radilištu moraju biti propisani zakonom. Visoko spremni i educirani radnici su ključ sigurnog radnog okruženja.

U rudarstvu postoje mnoge opasnosti, koje po MINERS priručniku (2019.) mogu biti podijeljene u četiri glavne grupe: opasnosti u zraku, fizičke, kemijske i biološke opasnosti.

### 1.1. Eksplozije

Eksplozija je izuzetno brza kemijska reakcija praćena praskom, oslobađanjem velike količine topline i naglim povećanjem volumena uslijed stvaranja plinovitih produkata. Osnovna je značajka eksplozije nagli skok tlaka u sredini gdje je ona izazvana, te ima razarajuće učinke. Detonacija je proces širenja kemijske reakcije unutar eksplozivne tvari nadzvučnom brzinom koja se kod gospodarskih eksploziva kreće između 2000 m/s i 8000 m/s, te se povećava s porastom gustoće eksploziva.

U rudarstvu su eksplozivi potencijalna opasnost za eksploziju, no njih se iskorištava na način da se kontrolirano koristi kemijska energija u obliku topline. Također, postoji opasnost od nekontroliranog oslobađanja pohranjene energije koja može biti nezamjećena prilikom rukovanja eksplozivima. Neželjeni događaji mogu dovesti do oštećenja opreme, infrastrukture rudnika, a šrapneli mogu uzrokovati ozljede ili, u najgorem slučaju, smrt radnika.

Eksplozije mogu biti:

- 1) Kemijske – visokoeksplozivne tvari, zapaljivi plinovi, fine čestice ili zapaljiva prašina (Slika 2-1)
- 2) Fizičke - Električne ili magnetske – iskre struja visokog napona ili povećani magnetski pritisak u jakim elektromagnetima (Slika 2-2)  
Mehanički kvarovi – odmak od sigurnosnog upravljanja strojevima ili puknuće guma na vozilima (Slika 2-3)



**Slika 2-1** Kemijska eksplozija (MINERS priručnik, 2019.)



**Slika 2-2** Eksplozija električnih ili magnetskih instalacija (MINERS priručnik, 2019.)



**Slika 2-3** Eksplozija uzrokovana mehaničkim kvarom (MINERS priručnik, 2019.)

## 1.2. Respiratorne opasnosti

Respiratorne ili opasnosti u zraku uključuju nekoliko tipova čestica, prirodnih plinova, ispušnih plinova i neke kemijske pare. Tri su moguća ulaza štetnih tvari u ljudsko tijelo, a to su: kroz želudac, kožu ili pluća, koji predstavlja i najbrži ulaz za štetne tvari.

Respiratorne opasnosti se klasificiraju kao:

- Nedostatak kisika
- Kontaminiranje plinovima i parama
- Kontaminiranje česticama (aerosoli, prašina, smog, dim, maglica, sprej)
- Kombinacija plinova, para i čestica

Nedostatak kisika ili akumulacija opasnih plinova se može pojaviti samo u zatvorenim prostorima, uključujući zgrade, tunele, kanalizaciju, svodove, spremnike ulja, goriva, kemijskih tvari, silose i posebice podzemne rudarske prostorije. U njima se mogu nakupljati plinovi i pare koji su zapaljivi, otrovni, koji guše, te se pojavljuje nedostatak kisika. Upravo zbog svoje zatvorenosti su podzemne prostorije u rudarstvu najopasnije prilikom požara i eksplozija jer dolazi do nakupljanja otrovnih plinova, dima, manjka kisika, te porasta temperature.

Dim predstavlja suspenziju sitnih čestica ugljika i katrana u zraku, ali i čestica prašine koje lebde u kombinaciji sa zagrijanim plinovima. Čestice predstavljaju kondenzacijsku površinu za plinovite produkte sagorjevanja, posebice aldehide i organske kiseline. Veličina čestica u dimu određuje koliko će daleko stići u plućima.

## 1.3. Plinovi

Plinovi koji se najčešće nalaze u rudnicima su: metan, ugljični monoksid, ugljični dioksid, sumporovodik, plinoviti produkti miniranja i ispušni plinovi strojeva, kao što su dušikovi oksidi. Plinovi koji su najvažniji, a prirodno se nalaze u ležištima, su metan i sumporovodik u ugljenokopima i radon u rudnicima urana i drugim.

Plinovi mogu biti zapaljivi i eksplozivni, također mogu biti štetni po ljudsko zdravlje ukoliko ih se udiše određeno vrijeme u koncentracijama iznad sigurne granice za taj vremenski period. Mogu uzrokovati gušenje, iritiranje grla, nosa, očiju, akutne respiratorne probleme, anoksiju ili druge plućne bolesti, čak i rak pluća tijekom dužeg perioda izlaganja plinovima.

Tijekom požara u rudniku se oslobađaju velike količine plinova koji su smrtonosni. Najveći izazov s kojim je suočen radnik pri požaru je njegova osobna zaštita od udisanja otrovnih plinova. Smrtonosne koncentracije otrovnih plinova se mogu kretati od nekoliko dijelova na milijun (ppm).

Prilikom požara se pojavljuju dvije najveće opasnosti po život, a to je udisanje otrovnih plinova kao što je ugljični monoksid i gušenje uslijed manjka kisika u takvoj atmosferi.

Opasnosti koje se pojavljuju tijekom požara u podzemnim prostorima su:

- Nedostatak kisika – stanje manjka kisika uslijed njegova trošenja za reakciju gorenja ili kemijskih reakcija i njegova zamjena otrovnim ili inertnim plinovima
- Dim – izaziva iritaciju i smanjenje vidljivosti, ali može biti i eksplozivan
- Eksplozivni plinovi – plinovi generirani požarom, a nalaze se u dimu, mogu eksplodirati.

Zrak u rudniku može biti kontaminiran i drugim plinovima, kao što su: ugljični monoksid, sumporni dioksid, sumporovodik, metan, oksidi dušika i ugljični dioksid.

Oni su prisutni kao:

- Posljedice miniranja ili drugih eksplozija
- Posljedice požara u rudniku
- Difuzija plinova iz rudnog tijela ili pratećih stijena, kao što je metan
- Raspada drvenih podgrada
- Apsorpcija kisika u vodi ili oksidacija drva ili rudnog tijela
- Ispušni plinovi dizelskih motora
- Plinovi ispušteni iz termalnih izvora – ugljični dioksid, sumporovodik.

Plinovi u rudniku utječu na ljude svojstvima zapaljivosti, eksplozivnosti ili toksičnosti, te ukoliko su inertni, zamjenom kisika u zraku. Radon je radioaktivni plin koji se prirodno pojavljuje u prisutnosti urana, kositra i nekih drugih ruda. On predstavlja izvor ionizirajućeg zračenja koje ugrožava ljudsko zdravlje.

U rudnicima zlata ili žive, radnici mogu biti izloženi otrovnim živinim parama. U rudnicima zlata i olova je prisutna opasnost trovanja arsenom i dobivanja raka pluća tijekom

ako izloženost traje dovoljno dugo. U rudnicima nikla je također prisutan rizik od raka pluća i kožnih obolijevanja.

#### 1.4. Prašina

Prirodna atmosfera sadrži plinovite sastavne dijelove, ali i veliki broj tekućih i krutih čestica čije je porijeklo različito, a zajedno se nazivaju aerosoli. Mogu biti produkt prirodnih ili industrijskih procesa i aktivnosti, kao što je vulkanska aktivnost, kondenzacija, dim, tlo i mikroflora (McPearson, 2009). Većina tih čestica je dovoljno mala da budu nevidljive golom oku i vrlo važno da imaju malu brzinu slijevanja. To znači da mogu biti suspendirane u zraku gotovo zauvijek. Čestice promjera manjeg od  $5 \cdot 10^{-6}$  m (5 mikrona) su one koje će zasigurno završiti u plućima i zato se nazivaju respirabilnim.

Prašina je pojam korišten za krute čestice u zraku. Njihova koncentracija može dosegnuti razine koje ljudski dišni sustav ne može efektivno izdvojiti u određenom vremenu. U rudarstvu, mineralna prašina se stvara svaki puta kada kamen biva slomljen udarcem, abrazijom, drobljenjem, mljevenjem, rezanjem, poliranjem ili eksplozijom. Fragmenti kamena kao takvi su nepravilna oblika. Velike površine na kojima je nataložena prašina su više aktivne od samih tvari od kojih su nastali, i to fizički, kemijski i biološki. To znatno utječe na sposobnost prašine da uzrokuje neku plućnu bolest.

Obzirom na opasnost za zdravlje i sigurnost, prašina je klasificirana u pet kategorija. (MINERS Priručnik, 2019.):

1. Toksična prašina – otrovna za tjelesno tkivo ili određene organe; u metalnim rudama; arsen, olovo, uran, živa, srebro, nikal, itd.
2. Kancerogene prašine – mutacije stanica uzrokovane ionizacijskom radijaciom, azbestna vlakna, čestice u ispušnim plinovima dizelskih motora.
3. Fibrinogena prašina – mikroskopski oštećuje plućno tkivo tijekom dužeg vremena izlaganja (kvarc, azbest, talk, itd.)
4. Eksplozivna prašina – ugljena prašina, sulfidne rude i metalne prašine postaju eksplozivne u određenim koncentracijama u zraku i mogu uzrokovati probleme za sigurnost, više nego zdravstvene probleme.
5. Prašina koja smanjuje vidljivost – sve prašine mogu biti iritantne za oči, nos i grlo, u visokim koncentracijama mogu smanjiti vidljivost, kao što su: halit, kalij, gips i vapnenac.

Najčešći oblik prašine u rudnicima i kamenolomima je silikatna prašina. Respirabilne čestice su formirane tijekom rudarskih operacija kao što su bušenje i miniranje ili drobljenje pješčenjaka, granita, škriljca i drugih stijena koje sadrže kvarc. Silikatna prašina može biti raspršena vjetrom, vozilima, i drugim strojevima ili ventilacijom. Rudari koji su izloženi silikatnoj prašini tijekom nekoliko godina mogu oboljevati od silikoze, koja često završava s tragičnim posljedicama.

Procesi koji proizvode najviše respirabilne prašine su bušenje, miniranje i rezanje. U cilju smanjenja emisije prašine, provode se određeni koraci u proizvodnji, kao što je korištenje strojeva koji koriste vodu u svom radu, ventilacija ispušnih plinova, kabine sa zračnim filterima za operatere strojeva, osobni respiratori i slično.

U podzemnim i površinskim ugljenokopima se pojavljuje najopasniji oblik prašine, ugljena prašina. To je prašina različitih primjesa, ovisno o tipu i sastavu samog ugljena, te pratećih stijena i primijenjene metode otkopavanja. Metoda širokog čela i primjena određenih strojeva tom metodom proizvodi najviše prašine. Radnici na ugljenokopima često obolijevaju od pneumokonioze ili bolesti „crnih pluća“, ali i bolesti kao što su kronični bronhitis i emfizema.

Ispušni plinovi strojeva s unutrašnjim izgaranjem su složene smjese plinova, para i čestica, te sadrže ugljični monoksid, dušikove okside i sumporne diokside, volatile organskih tvari, kao što su policiklični aromatski hidrokarbonati i nitro komponente. Ovi sastojci su iritirajući za organe dišnog sustava, te također kancerogeni. Smanjenje emisije tih plinova se postiže određenim dizajnom motora i filtera ili korištenjem visokokvalitetnih goriva i onih sa niskom koncentracijom sumpora. Ventilacija u podzemnoj eksploataciji mora biti prilagođena broju i tipu strojeva koji se koriste.

Prevenција bolestima uzrokovanih prašinom u rudarstvu su konstanti liječnički pregledi ili analize prašine i određivanja koncentracije respirabilne prašine u zraku. Zaposlenici u takvim radnim okruženjima moraju biti redovno podvrgnuti rendgenu pluća (svake dvije godine).

### **1.5. Fizičke opasnosti**

Osnovne fizičke opasnosti u rudarstvu su buka, vibracija, toplina, promjene tlaka i ionizacijsko zračenje.

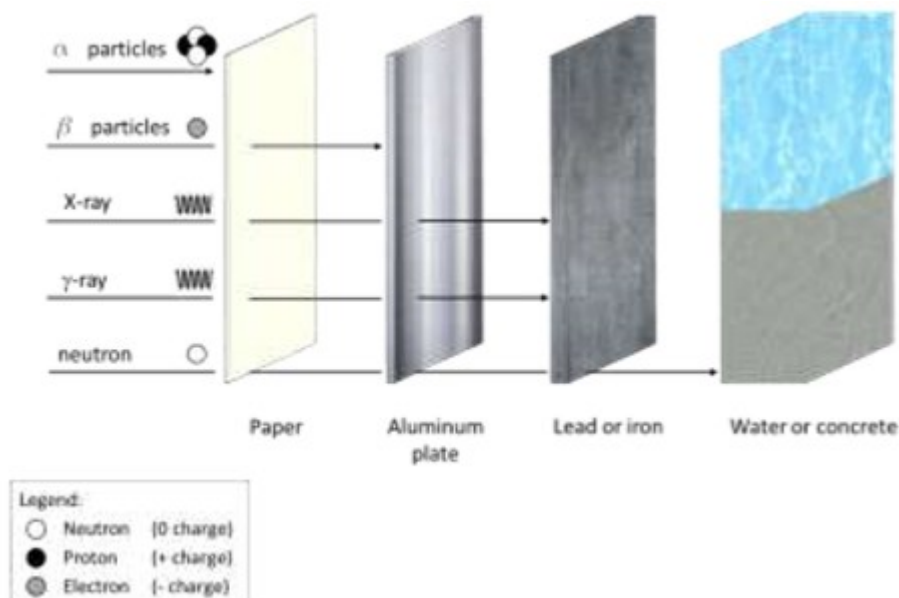
Upotreba različitih vrsta rudarskih strojeva i opreme, miniranja i ventilacije uzrokuje buku i vibracije, također se povećava opasnost od požara i eksplozija upotrebom dizelskih motora u rudnicima.

Izvor topline u podzemnoj eksploataciji je sama stijena, obzirom temperatura raste za 1 °C svakih 100 metara dubine. Drugi izvori topline mogu biti rudarski strojevi s dizelskim motorima, fizičke aktivnosti radnika i slično.

Izlaganje vrućem zraku može oštetiti dišni sustav. Ovisno o temperaturi, ono može uzrokovati ozbiljni porast krvnog tlaka i kolaps krvožilnog sustava (pri temperaturama većim od 50 °C). U rudnicima temperatura zraka prvenstveno ovisi o ventilaciji i količini cirkulirajućeg zraka.

Izlaganje ionizirajućim zrakama je štetno po ljudsko zdravlje na vanjskim i unutarnjim dijelovima ljudskog tijela, ali i putem izravnog kontakta. Za vanjske izvore zračenja su najvažniji čimbenici vrijeme izlaganja, snaga i udaljenost od izvora zračenja. Izlaganje izravnim dodirrom je rijetko jer uključuje rukovanje kontaminiranim materijalom. Najopasniji oblik zračenja je unutarnje zračenje čije posljedice ovise o obliku apsorpcije (probavnim ili dišnim sustavom), zahvaćenim organima i vremenu koliko će radioaktivne tvari ostati u tijelu.

Postoji nekoliko tipova zračenja, iz prirodnih ili antropogenih izvora: alfa čestice, beta čestice, gama zrake, X-zrake i neutroni, a njihova snaga zračenja je prikazana na Slici 2-4 .



**Slika 2-4** Različiti oblici zračenja i njihovo prodiranje kroz materijale (MINERS priručnik, 2019.)

## 1.6. Biološki agensi

Biološke opasnosti u rudarstvu su biološki agensi koji imaju štetno djelovanje na ljudsko zdravlje, a to su organizmi ili organske tvari koje su proizvod organizama. U njih se ubrajaju: virusi, bakterije, gljive, ostali mikroorganizmi i povezani toksini.

Biološki agensi mogu ući u ljudsko tijelo različitim putevima:

- Kroz oštećenu kožu
- Udisanjem
- Gutanjem
- Životinjskim ugrizom
- Probavnim traktom

Posljedice štetne po ljudsko zdravlje su uglavnom infekcije, alergije i otrovanje. Unutar skupina rudara koji žive na izoliranim lokacijama, postoji opasnost od prijenosa zaraze tuberkuloze, hepatitisa B i E, te HIV-a.

## 1.7. Kemijski agensi

Kemijski agensi su svi kemijski elementi ili komponente, zasebno ili u smjesi, koji se pojavljuju u prirodnom ili proizvedenom stanju, korišteni ili emitirani radnom aktivnošću, proizvedeni s namjerom ili ne. Svaka kemikalija koja je potencijalno štetna se naziva opasna kemikalija. Takve kemikalije mogu uzrokovati zdravstvene probleme (dišnog sustava ili iritaciju kože, ali mogu biti i kancerogene) ili predstavljaju fizičku opasnost ukoliko su zapaljive, eksplozivne ili oksidirajuće.

Kemikalije s tipičnim svojstvima i karakteristikama koje su relevantne uključuju:

- Zapaljive kemikalije
- Toksične ili korozivne kemikalije
- Kemikalije koje emitiraju toksične pare prilikom požara
- Kemikalije koje u kontaktu s vodom otpuštaju zapaljive plinove
- Oksidirajuće kemikalije
- Eksplozivi
- Nestabilne kemikalije
- Komprimirani plinovi



Načini izlaganja kemikalijama au:

- Inhalacijom (udisanjem kontaminiranog zraka i kemijskih tvari)
- Apsorpcijom (dodirom s kožom i očima)
- Probavom (putem kontaminiranih ruku)
- Injektiranjem (kroz oštećenu kožu)

Posljedice opasnih kemikalija mogu biti vidljive pri kontaktu s njima (npr. opekotine) ili nekoliko godina poslije izlaganja (npr. rak pluća), također su posljedice vidljive nakon kratkog ili dugog perioda izlaganja opasnim kemikalijama.

Nesreće od svih navedenih opasnosti mogu prouzročiti različite reakcije ljudi, što je i očekivano u teškim situacijama. Svi koji su sudjelovali u nesreći će biti šokirani i trenutno dezorijentirani, ali većina će se brzo prilagoditi nastaloj situaciji i pravovremeno reagirati. Takve pravovremene reakcije na nesreće su od velike važnosti ukoliko postoje ljudske žrtve koje trebaju pomoć.

Spasioci u takvim situacijama imaju svoj način reagiranja, vrijednosti i sposobnosti pomaganja unesrećenima. U nesrećama će biti pogođeni i šokirani, no njihove reakcije ne smiju utjecati na njihovu sposobnost obavljanja misije.

U rudarstvu su prisutne razne okolnosti koje dovode do opasnosti, kao i korištena oprema, kemikalije, eksplozivi, ulja i goriva. Stoga je od velike važnosti educirati radnike s kakvim materijalima i tvarima rukuju, te koje su potencijalne opasnosti. Na radnim mjestima kod kojih se rukuje opasnim tvarima i opremom, važno je vizualno upozoravati zaposlenike, a najčešći način koji je propisan regulacijama o sigurnosti i zaštiti na radu su simboli opasnosti kao na Slici 2-5.



Slika 2-5 GHS piktogrami opasnosti (Preventa, 2019.)

## 2. POŽARI I EKSPLOZIJE U PODZEMNOJ EKSPLOATACIJI

### 2.1. Vatreni trokut i proces gorenja

Već je bilo spominjano kako je od ključne važnosti edukacija zaposlenika u podzemnoj eksploataciji o prisutnim opasnostima, njihovim uzrocima, prevenciji, te svladavanju ukoliko dođe do havarija. Stoga su u ovome radu obrađene neke od navedenih tema kao što su uzroci, prevencije, svladavanje požara i eksplozija u rudniku.

Osnove s kojima se upoznaju vatrogasci su prvenstveno vatreni trokut i proces zapaljenja tvari. Na Slici 3-1. je prikazan trokut s uvjetima nastanka vatre, a ono zahtjeva prisutnost goriva, topline i kisika. Izostanak jednog od ova tri uvjeta neće dovesti do nastanka vatre.

Goriva mogu biti prisutna u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju. Tekuća goriva i plinovi mogu biti prisutni u rudnicima prirodnim putem, odnosno iz stijenske mase, te produkt rudarskih operacija ili zagrijavanja krutih materijala.



**Slika 3-1** Vatreni trokut (ZNR, 2019.)

U trenutku kada je zapaljiva, čvrsta ili tekuća tvar zagrijana do dovoljno visoke temperature (temperature paljenja), ono će proizvesti pare koje su zapaljive iskrom, plamenom ili vrućom podlogom koja ima potrebnu koncentraciju i dovoljno vrijeme emitiranja toplinske energije.

Primjerice, benzin ima temperaturu paljenja od  $-45^{\circ}\text{C}$ , dok je za većinu dostupnih krutih goriva potreban plamen kako bi se dosegla temperatura paljenja. Temperatura paljenja bilo koje tvari je najniža temperatura pri kojoj je moguća održiva reakcija gorenja. (M.J. McPherson, 2009). Zapaljenje je proces brze oksidacije para uz oslobađanje topline i svjetlosti. U slučaju samoodrživog procesa gorenja, oslobođena topline je dovoljna za podizanje temperature ostatka gorive tvari ili okolnog područja i površina, do točke paljenja. Međutim, gorenje može nastaviti svoj proces bez zapaljenja, odnosno otvorenog plamena, te se takav proces naziva tinjanje. (M.J. McPherson, 2009). U tom slučaju, oksidacijski proces nastavlja površinom gorive tvari i proizvodi dovoljno topline da bude samoodrživ, ali ne dovoljno za emisiju para u količinama potrebnim za gorenje otvorenim plamenom.

Kisik kao treća komponenta vatrenog trokuta je dostupan u zraku. Zapaljive tekućine, kao što je ulje sigurnosne lampe, će prestati goriti kada se razina kisika smanji na 16 %. Gorenje svih mogućih tvari je onemogućeno pri koncentraciji kisika od 10 % do 12 %, dok je za tinjanje ta razina ispod 2 %. Međutim, određeni materijali sadrže dovoljno kisika koji im omogućuju gorenje pri manjim koncentracijama atmosferskog kisika. To svojstvo omogućuje stvaranje „vrućih točaka“ u drobljenim materijalima i može rezultirati ponovnim zapaljenjem u prisustvu veće količine kisika.

## 2.2. Klasifikacija rudarskih požara

Podzemni požari mogu biti klasificirani u dvije opće grupe, egzogeni i endogeni požari. Otvoreni požari se pojavljuju u ventilacijskim putevima, na čelima radilišta i drugim otvorenim područjima rudnika koji čine dio ventilacijskog sustava rudnika, stoga brzi i izravno utječu na kvalitetu rudničke ventilacije. Kao što im naziv govori, egzogeni požari su praćeni gorenjem otvorenim plamenom zbog prisustva kisika, ali i omogućen je izravan pristup vatrogascima i njegovom gašenju.

Suprotno tomu endogeni požari se pojavljuju u područjima na kojim je gotovo nemoguće pristupiti, kao što su urušena ili napuštena područja. Oni se obično pojavljuju kao rezultat samozapaljenja i prisutni su u ugljenima i sumpornim rudama kao i u dopremljenim materijalima poput papira, odbačene tkanine ili drvene podgrade u napuštenim područjima. Razina onečišćenja rudarske atmosfere endogenim požarom, kao i njegovo širenje, ovisi o kretanju zračnih struja iz zahvaćenih područja.

## 2.3. Uzroci požara u rudniku

Raznovrsnost primjene procedura, procesa i materijala u modernom rudarstvu, omogućuje mnoge prilike za zapaljenje gorivih materijala. Uobičajeni uzroci požara i eksplozija u rudarstvu su obrađeni u daljnjem tekstu, te kroz pregled nesreća u rudnicima.

### 2.3.1. Mehanizacija

Strojevi koji su namijenjeni podzemnoj eksploataciji moraju biti dizajnirani da osiguravaju visok stupanj sigurnosti pri rukovanju u teškim uvjetima rada, te biti sukladni propisanim zakonskim zahtjevima i uvjetima u državama u kojima se koriste.

Većina požara, vezana za mehanizaciju, izbija zbog:

- Nepravilnog korištenja
- Nedostatka održavanja
- Skidanje ili prespajanje sigurnosnih značajki kao što su dijagnostički uređaji, uređaji za motrenje okoline ili termalni prekidači i slično
- Rad bez nadzora duži vremenski period

Ispušni sustavi dizelske opreme moraju biti opremljeni filterima čestica ili vodenim pročistačima koji reduciraju zagađenje zraka i sprječavaju emisiju užarenih čestica. Nadalje, cijevi, ulja prijenosa ili kočnica i razne druge komponente izrađene od sintetičkih materijala,

na dizelskim strojevima mogu proizvesti toksične plinove prilikom izgaranja. Sva vozila i druga dizelska oprema moraju biti opremljeni bocama za gašenje požara.

Važno je da oprema koja sadrži velike količine goriva, kao što su veliki transformatori ili kompresori zraka, moraju biti osigurani termalnim prekidačima, sigurnosnim ventilima za smanjenje pritiska i drugim uređajima neophodnim za automatsko gašenje u opasnim slučajevima. Takvi uređaji moraju biti redovito testirani i održavani.

Nepokretna postrojenja moraju biti postavljena u blizini skloništa s krovom, podom i zidovima otpornim na vatru, i koji imaju zasebnu ventilaciju. Također, aparati za gašenje požara i automatski sustavi gašenja požara moraju biti dostupni u takvim skloništim. U ugljenokopima, okruženje ventilacijskim hodnika mora biti redovno obloženo kamenom prašinom.

### 2.3.2. Električni uređaji

Električni uređaji, posebice na mehanizaciji u rudniku, mogu izazvati požare i eksplozije svojim iskrenjem ili pregrijavanjem. Razvodne kutije ili stanice za punjenje akumulatora, moraju biti postavljene tako da nisu u opasnosti od pada krova. Takve opasnosti su moguće u blizini radilišta na kojemu se dobiva ruda. Prekidači za paljenje bi trebali biti zaštićeni od neopreznih radnji operatera, padajućeg materijala ili prometa. Električne stanice i stanice za punjenje akumulatora bi trebale biti opremljene s aparatima za gašenje požara koji nisu na vodu.

Električni kablovi u hodnicima bi trebali biti ovješeni kao vodovi za trolej i učvršćeni za krov. Moraju biti smješteni na način da ne mogu biti prekinuti konvergencijom ili popuštanjem krovnih podgrada, niti biti pod utjecajem vozila. Izolacija takvih vodova i njihova zaštita, mora biti projektirana prema električnom naponu i uvjetima podzemne eksploatacije. Također su podložni redovnim inspekcijama i provjeri mogućih oštećenja.

Električni kvarovi moraju biti popraćeni trenutnim prekidom opskrbe energije ukoliko je došlo do preopterećenja. U rudnicima u kojima su prisutni zapaljivi plinovi, svi električni motori i uređaji moraju biti izvedeni u protueksplozijskoj zaštiti oklapanje Ex d kako ne bi došlo do zapaljenja metana ukoliko se nalazi u okruženju. Sva signalizacijska i ostala rasvjeta, također mora biti izrađena tako da ne proizvede iskrenje koje može zapaliti metan.

Tijekom smjena u kojima se ne radi, električna energija u rudniku može biti isključena u trafo stanicama. Moraju biti instalirani zaštitni uređaji za slučajeve prevelikog napona uslijed udara munje na površinskim izvorima energije, transformatorima, trafostanicama ili nekim

drugim vodovima koji mogu prenositi napon do podzemnih radilišta. Slično, treba posebno paziti na prijenos električne energije u blizini eksploziva ili skladišta goriva kako ne bi došlo do njihova iniciranja.

### 2.3.3. Transportne trake

Požari transportnih traka su bile predmet izučavanja zbog svog brzog širenja plamena duž gumenih traka koje su se u početku koristile. Moderne trake koje se koriste u podzemnoj eksploataciji moraju biti podvrgnute testiranju brzine širenja vatre (McPherson, 2009). Tri su tipa materijala koji se koriste za transportne trake: stiren-butadienska guma (SBR), neopren (NP) i polivinilklorid (PVC). Nakon paljenja materijala trake i uklanjanja izvora paljenja, požar se ne bi smio širiti ili bi se sporo širio. Važno je za naglasiti kako zagrijani materijal trake otpušta opasne pare.

Brojni su testovi pokazali kako je brzina širenja požara transportnih traka povezana s brzinom zračnih struja (Mcpherson, 2009). Pri relativnoj brzini od 1,5 m/s između površine trake i zračne struje se pojavljuje fenomen poznat kao prijelaz bljeska, odnosno plamena. Prijelaz plamena se pojavljuje kada plamena fronta goruće trake dosegne površinu koja još nije zahvaćena požarom, pri optimalnom kutu i duljini, tako da se postigne učinak zračenja plamena na toj površini. To može uzrokovati paljenje površinskog sloja trake i značajno ubrzanje širenja požara duž trake. Donji slojevi trake mogu, ali i ne moraju biti zapaljeni u tom brzom širenju vatre. Ovaj se učinak promatrao na trakama napravljenim od SBR, PVC i njihove kombinacije. Takav brzi prijelaz plamena čini veliku opasnost, obzirom se požar može širiti i brzinom od 10 m/min.

Požari transportnih traka su najčešće inicirani trenjem. Ukoliko se traka zaglavi u nekoj točki svoje duljine i pogonski valjci nastave se okretati, stvorit će se velika temperatura između trake i valjka. Sustavi praćenja temperature ili uređaj za natezanje trake mogu detektirati takvo stanje. Takvi uređaji bi trebali prekinuti opskrbu električne energije kada se uoči takvo stanje transportne trake. Slično stanje može prouzročiti i povratni valjak preko kojega se vrti traka i uzrokuje veliko trenje između. Stoga bi svi takvi dijelovi transportne trake trebali biti redovno kontrolirani tijekom rada. Valjci s pokidanim ležajevima su često bučni i mogu biti uočeni po mirisu zagrijanog materijala. Daljnju opasnost čini trenje između trake i okolnih površina, ukoliko dođe do pomaka trake u stranu.

U svim spomenutim slučajevima, požar može nastati zagrijavanjem maziva, ugljene prašine ili zapaljivih krhotina kada dosegnu svoju točku paljenja. Slijedi da se prašina i

prolijevane tvari ne bi smjele nakupljati okolo i naročito ispod trake. Čista transportna traka je sigurna traka.

#### 2.3.4. Ostali uzroci požara trenjem

Glavni uzrok paljenja metana na čelima radilišta ugljenokopa je iskrenje uslijed trenja radnog alata i stijene. Pojava iskrenja se često pojavljuje kada stroj reže kroz pješčenjak ili pirit. Prisutna su dva pristupa smanjenja tog rizika. Jedan je osiguravanje dovoljne ventilacije radilišta kako bi se uklonio metan pri samoj pojavi. Važna je ventilacija i u cijelom rudniku kako bi se spriječilo nakupljanje metana. Nažalost, dobra ventilacija ne rješava problem ugljene prašine ukoliko se ne koriste mokri pročistači.

Drugi pristup je korištenje vode na čelima radilišta kako bi se spriječilo iskrenje uslijed trenja opreme i stijene. Ova metoda sprječava nakupljanje prašine i njeno zapaljenje, te paljenje metana iskrenjem. To je postignuto mlaznicama vode na čelu radilišta i još učinkovitije, rezanjem uz mlaz vode.

Sustavi za povlačenje užadi su također bili uzrok pojedinim požarima u rudnicima. Svi pogonski i povratni bubnjevi moraju biti redovno održavani i podmazivani. Užad se ne bi smjela trljati od čvrste površine krova, zidova ili poda hodnika, posebice drvene podgrade. Rad takvog sustava povlačenja užadi mora biti redovno kontroliran, kao i sustavi kočenja.

#### 2.3.5. Eksplozivi

Iniciranje požara eksplozivom ili štapinom predstavlja opasnost u nemetanskim rudnicima. Užarene čestice uslijed miniranja sadrže dovoljno toplinske energije da zapale suho drvo ili zapaljivi otpad. Štapin nikad ne bi smio biti ovješeno na drvenoj podgradi. O eksplozivima i detonirajućim uređajima se mora voditi evidencija i kontrola pri rukovanju. Određeni državni propisi i zakoni nalažu uvjete skladištenja eksploziva u podzemnim spremištima.

#### 2.3.6. Zavarivanje

Svi radovi zavarivanja u podzemnim rudnicima moraju biti izvedeni po strogo kontroliranim uvjetima. Gdje postoji opasnost od pojavljivanja metana i drugih zapaljivih plinova, zavarivanju treba prethoditi ispitivanje koncentracije tih plinova, te tijekom samog zavarivanja. Vrući metal i iskre od zavarivanja lako mogu inicirati zapaljive materijale, kao

što su ugljen, drvo, papir i otpadne tkanine. Kad je moguće, takvi materijali bi trebali biti uklonjeni od mjesta zavarivanja, te mjesto rada namočeno ili prekriveno kamenom prašinom. Taljeni metal ne bi smio kapati na pod, te bi aparati za gašenje požara morali biti dostupni na mjestu zavarivanja.

Spremnici plina koji se koriste pri rezanju oksii-acetilenom bi morali biti skladišteni u uspravnom položaju. Također, svi spremnici plina ne smiju biti skladišteni u blizini eksploziva ili u prisutnosti zapaljivih tekućina.

### 2.3.7. Pušenje i sigurnosne svjetiljke

Tužna je činjenica kako je pušenje rudara uzrok pojedinih požara i eksplozija u rudnicima. U rudnicima koji se klasificiraju kao metanski, unos takvih materijala (cigareta) je strogo zabranjen. Svi zaposlenici rudnika moraju biti upoznati s pravilima o nepušenju i primjerima posljedica neodgovornog ponašanja.

U podzemnim prostorijama gdje je dopušteno pušenje, zaposlenici moraju biti upoznati s posljedicama neodgovornog ponašanja i nepropisnog odlaganja opušaka, i to educiranjem, posterima, sigurnosnim naljepnicama i znakovima opasnosti.

Oštećene sigurnosne svjetiljke s plamenom su također bile uzrok pojedinim zapaljenjima metana. U pojedinim rudnicima gdje su ostale u primjeni, one moraju biti upotrijebljavane s velikim oprezom i redovno pregledavane prilikom izmjene smjena. Plamen lampe, pri visokim koncentracijama metana, svijetli plavom bojom te pojačano gori. U tom slučaju bi svjetiljka trebala biti spuštena ili prekrivena. Radnici bi trebali biti upoznati s mjerama opreza jer je prirodna reakcija u tim situacijama da se lampa baci na pod ili bježi u panici.

## 2.4. Egzogeni požari

Požari koji izbijaju u rudarskim prostorijama uglavnom potječu od jedne točke paljenja. Početna vatra je često mala i većina ih se može ugasiti brзом reakcijom. Ključ nastanka požara je u brzini širenja vatre. Zapaljenje koje ostaje nezapaženo, makar i na par minuta, može se razviti u požar kojega je teško svladati. Zatvaranje dijela rudnika ili hodnika tada postaje neizbježno.

Trenutak u kojemu će se dogoditi otvoreni požar ovisi o toplini izvora paljenja. Fina izmaglica prskajućeg ulja pokvarenog kompresora zraka može biti kao bacač plamena i zapaliti se u par sekundi. Na drugu stranu, propuštanje napona u zemlju od pokvarenog



električnog voda može uzrokovati tinjanje na par sati prije nego se plamen pojavi. Daljnji razvoj požara ovisi o prisutnosti goriva i kisika. Požar nekog stroja u nepodgrađenom prostoru rudnika će biti lokaliziran ukoliko oko nema materijala za gorenje. S druge strane, hodnik s drvenom podgradom ili površina ugljena na krovu, zidovima ili podu čini spremnu površinu za brzi razvoj i širenje požara.

Kada se požar dovoljno razvije da načini određene promjene u temperaturi i strujanju zraka, tada utječe na distribuciju zraka u rudničkoj ventilaciji. Nasuprotno tome, dostupnost kisika na požarištu kontrolira njegovo širenje. O povezanosti između zračnih struja u rudniku i požara, te njegovo svladavanje će biti obrađeno u nastavku.

#### 2.4.1. Požari bogati kisikom i gorivim tvarima

Egzogeni požar u ventiliranom prostoru pri svom nastanku ima dostupnu veliku količinu kisika, više nego dovoljno za zapaljenje gorivog materijala. Ukoliko je velika brzina zračne struje, te ako je niske temperature, tada toplina iz otvorenog požara može biti uklonjena većom brzinom nego što nastaje. Pri uklanjanju topline iz vatrenog trokuta je i sama vatra ugašena, odnosno, „otpuhana“. To su primjeri požara bogatog kisikom. Ukoliko se požar nastavi širiti, ono će trošiti sve veće količine kisika, i u isto vrijeme, proizvoditi velike količine plinova i para. To može dovesti do situacije u kojoj vatra otpušta veliku količinu topline čija temperatura je dostatna za otpuštanje plinova i para iz ugljena, drvene podgrade ili drugih dostupnih materijala, ali ih ne može sagorijeti do kraja zbog nedostatka kisika. U tom slučaju požar postaje bogat gorivom.

Razvoj požara iz bogatog kisikom u bogatog gorivom je ozbiljan napredak požara i kao takav postaje opasan za vatrogasce. Kada zapaljivi plinovi dosegnu temperaturu koja je dostatna za njihovo gorenje, uz dotok svježeg zraka će se zapaliti. Dodatna turbulencija zračne struje će dovesti do miješanja zraka i plinova koji mogu uzrokovati eksploziju. Ovaj fenomen se može dogoditi nizvodno od egzogenog požara ukoliko postoji dotok svježe zračne struje iz susjednog hodnika. Dotok svježe zračne struje iz susjednog hodnika mora biti u smjeru vatre kako se požar ne bi proširio na susjedni hodnik, no miješanje plinova i zraka može dovesti do eksplozije i bržeg razvoja požara, stoga se pred vatrogascima nameće teška odluka.

Slična pojava se događa kada tok vrućih plinova uzrokuje povrat dima suprotno dotoku zračne struje pri vrhu hodnika. Ova pojava se može dogoditi iznad glava radnika i vatrogasaca koji se bore s vatrom iz protustrujnog položaja. Gorenje plinova duž zračnog

sučelja se može pojaviti pri gorenju ugljena ili drvene podgrade pri vrhu hodnika, te uzrokovati eksploziju. Osoblje koje sudjeluje u gašenju požara bogatog gorivom mora biti svjesno opasnosti od brzog kretanja plamena i pulsiranja pritiska uslijed kretanja zračne struje. To je uzrokovano valjanjem plamena i blagim eksplozijama uslijed miješanja zraka i plinova i njegovog gorenja. Ista pojava se događa pri gorenju metana.

Slijedi kako svaki pokušaj svladavanja požara mora biti prevencija razvoja požara bogatog gorivom iz požara bogatog kisikom. To zahtjeva rano otkrivanje požara i brzo djelovanje. Intuitivna reakcija na požar može biti ograničavanje dotoka zraka i uklanjanje kisika iz vatrenog trokuta. Ono može biti postignuto izradom pregrada ili podizanjem pregrada od platna uzvodno od zračne struje požara. Međutim, uzimajući u obzir sve opasnosti požara bogatog gorivom upućuje na to da ograničavanje dotoka zraka nije preporučljivo. Analizom plinova u smjeru zračne struje od požara se može ustanoviti je li požar bogat kisikom ili gorivom.

#### 2.4.2. Utjecaj požara na ventilaciju

Egzogeni požar utječe izravno na ventilaciju rudnika jer uzrokuje nagli porast temperature zraka. Rezultirajuća ekspanzija zraka dovodi do dvije pojave. Prvo, ekspanzija nastoji zauzeti mjesto u oba pravca hodnika. Širenje ekspanzije u suprotnom smjeru zračne struje uzrokuje otpor zračnoj struji. Ova pojava je poznata kao „efekt gušenja“. Nadalje, povećanje gustoće zagrijanog zraka dovodi do njegovog uzgona koji uzrokuje lokalne promjene, ali i promjene u tlaku prirodne ventilacije.

Učinak požara na snagu zračne struje, ovisi o reakciji ventilatora, tlaku prirodne ventilacije i kontroli ventiliranja kroz sustav. Međutim, ukoliko se ne poduzme promišljena radnja kako bi se utjecalo na neke od ovih faktora, smatra se kako oni ostaju relativno konstantni.

#### 2.4.3. Učinak uzgona (prirodni propuh)

Gotovo trenutni učinak topline na zračne struje su uglavnom lokalnog karaktera. Smanjena gustoća uzrokuje miješanje vrućeg zraka i produkata gorenja, te njihovo širenje u gornjem djelu hodnika. Takozvani efekt uzgona dovodi do stvaranja sloja dima i vrućih plinova u gornjem djelu hodnika, te njihova širenja suprotno zračnoj struji.

Ova pojava povrata dima stvara poteškoće vatrogascima koji se nalaze u smjeru zračne struje od požara, posebice ako je požar postao bogat gorivom. Povrat dima je očit jer se jasno vidi, ali on skriva velike koncentracije ugljičnog monoksida. Nadalje, visoke temperature povrata dima mogu dovesti do zapaljenja materijala u stropu hodnika i iznad vatrogasaca. Najveća opasnost je u plamenu plinova ili u lokalnim eksplozijama koje se mogu pojaviti u povratu dima i okružiti vatrogasce.

Jedna od metoda sprečavanja nastanka povrata dima je pojačavanje zračne struje hodnika. Na drugu stranu će to dovesti do bržeg razvoja požara. Druga metoda je postavljanje platnenih pregrada koje pokrivaju 60 % do 80% donjeg djela hodnika. Tako se povećava brzina zračne struje u gornjem djelu hodnika koja pomaže u kontroliranju povrata i omogućuje pristup vatrogascima. Međutim, ova metoda može dovesti do miješanja povrata dima i plinova sa zrakom, te tako stvoriti eksplozivnu smjesu ispred pregrade. Nadalje, dodatna prepreka zračne struje s pregradom može dovesti do smanjenja ukupne zračne struje pri požaru bogatom gorivom. Ponašanje otvorenog požara je vrlo osjetljivo na promjene dotoka zraka. Stoga bi svake promjene trebale biti napravljene polako, manjim koracima, uz promatranje njihova učinka na požar.

Treća metoda sprečavanja povrata dima je prskanje stropa hodnika vodom. Porastom vlažnosti materijala u stropu hodnika, indukcija uslijed prskanja će pospješiti kretanje zračne struje u gornjem djelu hodnika.

Veći utjecaj promjene gustoće zraka je vidljiv u oknima ili niskopima i uskopima. Učinak je najveći kada se požar nalazi u oknu ili nagnutom hodniku kada može dovesti do okretanja smjera strujanja zraka. S napredovanjem požara, ono može uzrokovati nekontrolirano širenje toksičnih plinova.

Utjecaj požara na prirodnu ventilaciju može biti promatran kroz temperaturu zraka nizvodno od požara. Promjena temperature u tom slučaju ovisi o:

Veličini i jačini požara

Udaljenosti od požara

Vremenu

Pritoku svježeg zraka u hodnik zahvaćen požarom

Karakteristikama prijenosa topline između zraka i okruženja.

Temperatura zraka uvijek pada eksponencijalno s povećanjem udaljenosti od požara. S utvrđenom temperaturom u svim dijelovima hodnika nizvodno od požara, mogu se ustanoviti promjene prirodne ventilacije u hodniku. Ti podaci mogu biti primijenjeni u analizi i

predviđanju utjecaja požara na zračne struje, te promjene i smjer u kojemu će biti zahvaćen rudnik pri požaru. Stoga je razvijen velik broj simulacija požara na kojima se primjenjuje numeričko modeliranje požara u rudniku.

#### 2.4.4. Metode gašenja egzogenih požara

Većina egzogenih požara mogu biti ugašeni brzo ukoliko se pravovremeno djeluje. To za sobom povlači dobar sustav detektiranja požara, uvježbanosti zaposlenika, razvijen sustav gašenja požara i potpuno ispravnu vatrogasnu opremu. Aparati za gašenje požara bi trebali biti dostupni na vozilima i na svim područjima u kojima postoji opasnost od izbijanja požara. To uključuje skladišta i lokacije na kojima se parkiraju vozila, te električna oprema, kompresori zraka i pokretne trake.

Na lokacijama gdje se nalazi struja, ne bi smjeli biti korišteni voda niti pjena u gašenju požara ukoliko nije došlo do njenog isključivanja. U takvim slučajevima se koriste aparati za gašenje koji sadrže ugljični dioksid ili prah.

Sustavi prskanja i ispuštanja vode mogu biti vrlo učinkoviti na područjima sa fiksnim postrojenjem, skladištima i iznad transportnih traka. Takvi sustavi se aktiviraju termalnim sensorima prije nego detektorima dima ili plinova kako bi se sustav uključio samo pri pojavi gorenja.

#### 2.4.5. Gašenje požara vodom

Voda je najčešći medij za gašenje požara, osim na područjima gdje ima struje ili zapaljivih tekućina. Kada se voda primjeni na površinu koja gori, ona pomaže uklanjanju dvije komponente vatrenog trokuta. Latentna toplina vode pri njenom isparavanju i toplinski kapacitet vodene pare sudjeluje u uklanjanju topline gorućeg materijala. Nadalje, zamjena zraka vodenom parom i oblaganje tekućinom ugašenih površina, pomaže pri izoliranju kisika iz vatre.

Voda se uobičajeno primjenjuje putem crijeva uzvodno od požara. Poteškoće u primjeni vode za gašenje požara u podzemnim prostorima je u ograničenom dohvat mlaznica vode zbog visine hodnika i ograničenoj količini vode pri određenom pritisku na požarištu. Kako bi voda pokrila područje od 30 m ugljenokopa, pritisak vode bi trebao biti od 800kPa do 1400 kPa i snabdijevati nekoliko crijeva putem razdjelnice na hidrantu. U praksi se koriste mlaznice vode koje imaju doseg do 10 m. Mlaznice vode se mogu podešavati da izbacuju mlaz ili maglicu vode.

Teške nesreće u prošlosti ukazuju na potrebu dobro razvijenog sustava gašenja požara u rudniku. Zrak i voda trebaju imati isti smjer strujanja ako vatrogasci ne bi morali ići po izvor vode kroz požar. Položaji hidranata moraju biti locirani na strateškim pozicijama kako bi pokrili sva područja na kojima postoji opasnost izbijanja požara, duž hodnika i križanja gdje postoje pristupni ulazi. Hidranti su inače opremljeni nemetalnim dijelovima kako ne bi došlo do korozije, te također moraju biti jednostavni za uporabu. Sva oprema za gašenje požara mora biti redovno održavana i kontrolirana.

Ukoliko je moguć pristup vatri kroz hodnik koji je paralelan požarištu, tada se može primijeniti prskanje vodom kroz vrata ili pregrade na vatru. Takva primjena je učinkovita u ranoj fazi razvoja požara, te gubi na učinkovitosti ako je došlo do razvoja požara bogatog gorivom.

Lokacija pumpi za vodu i konfiguracija njihova snabdjevenija energijom trebaju biti projektirani prema tlocrtu rudnika. Pumpe i put njihovih kabela ne smiju biti u opasnosti od zahvaćanja vatrom. Također, snabdjevenije energijom pumpi treba biti omogućeno i kada je prekinut dovod struje na područje rudnika zahvaćeno požarom. Pri gašenju požara bi trebale biti dostupne i količine vode s površine.

#### 2.4.6. Gašenje požara ekspanirajućom pjenom

Veliki obujam pjene na bazi vode čini koristan alat pri gašenju požara u skućenim prostorima kao što su podrumi zgrada ili brodske komore. Prve upotrebe pjene u gašenju požara u rudnicima seže u 1956. godinu. Ova metoda je primijenjena na velikim požarima i iako je imala ograničen uspjeh u rudničkim požarima, ima veliku ulogu u vlaženju i hlađenju požarišta, te tako omogućava vatrogascima lakši pristup u borbi s vatrom.

Mjehurići pjene se proizvode pomoću ventilatora koji puše zrak kroz nategnutu platnenu mrežu. Mreža je konstantno prskana mješavinom vode i pjenila. Mjehurići mogu biti proizvedeni i u količinama od nekoliko kubičnih metara po sekundi. (McPherson, 2009). Komponente kao što je amonijev lauril sulfat se može koristiti kao pjenilo, dok dodatak karboksimetil celuloze čini mjehuriće stabilnima.

Cilj je proizvesti čep od ekspanirajuće pjene koji ispunjava hodnik i kreće se prema požaru pomoću zračne struje ventilatora. Odnos zraka na prema vodi u pjenu može biti u odnosu 100:1 do 1000:1. Kako pjena napreduje prema vatri, tako mjehurići pucaju pri dodiru sa suhom površinom hodnika. Skupljanje pjene se pojavljuje konstantno na rubovima hodnika i ubrzava zbog zračenja topline približavanjem vatri.

Kontrola požara je postignuta putem dva mehanizma. Prvo, isparavanje vode uklanja toplinu i, drugo, povećava koncentraciju vodene pare čime se postiže atmosfera pogodna za gašenje vatre. Zrak u mjehurićima se širi za 30 % pri temperaturi od 100 °C. Isparavanje vode uključuje ekspanziju plinova u odnosu 1700:1. Uzimajući pretpostavku kako je omjer zraka i vode u pjeni 1000:1, 1000 litara zraka expandira na 1300 litara dok 1 litra vode isparava i postaje 1700 litara vodene pare, dajući ukupni volumen od 3000 litara smjese. Ukoliko je postotak kisika u zraku 21 %, tada će isparavanje vode to reducirati na

$$21 \times \frac{1300}{3000} = 9,1\% \text{ što će dovesti do gašenja vatre.}$$

Unatoč navedenim mehanizmima gašenja, expandirajuća pjena ima nedostatke. Prvo, teško je proizvesti čep od pjene koji u potpunosti zapunjuje hodnik. Kako čep nastaje, tako se povećava brzina zračne struje kroz razmak između čepa i stropa u nastojanju da održi taj razmak otvorenim. Upotreba platnenih pregrada može pomoći u stvaranju kompletnog čepa pjene. Važno je kontrolirati put pjene, što može biti problem u rudnicima s brojnim ulazima i hodnicima. Pjena je usmjerena pomoću zračne struje ventilacije, te u ovo slučaju može pomoći pregrada ili zapreka na križanjima hodnika. Pri velikim požarima se pojavljuju i urušavanja stropa što može spriječiti napredovanje pjene.

Najveća opasnost primjene čepa pjene je ograničenje protoka zraka što može dovesti do nastajanja požara bogatog gorivom i opasnosti od eksplozija. Plinovi nizvodno od požara moraju biti praćeni u ovom slučaju. Pri primjeni pjene u gašenju požara je zapažen porast i pad koncentracije zapaljivih plinova, iako ograničenje protoka zraka može dovesti do porasta koncentracije zapaljivih plinova. Međutim, kako inertna smjesa zraka i vode napreduje, tako dolazi do kondenzacije vode, dopuštajući prodor zraku i smanjivanju razine zapaljivih plinova.

#### 2.4.7. Kontrola putem ventilacije

Pri uvođenju promjena protoka i tlaka zraka tijekom požara, pojavljuju se četiri učinka koja moraju biti pažljivo promatrani.

Učinak na proces gorenja: važnost izbjegavanja napredovanja požara od bogatog kisikom do bogatog gorivom.

Učinak na smjer i stopu napredovanja požara: svako djelovanje mora biti ka prevenciji širenja otvorenog požara na druge hodnike. Međutim, nekad postoje izuzeci od ovog pravila kako bi se produkti gorenja usmjerili od prostorija u kojima su zarobljeni radnici. Primjer je namjerno rušenje pregrada kako bi se preusmjerila zračna struja koja dolazi od mjesta

požara. Svaka promjena u zračnim strujama koje prolaze kroz požarište, mora biti usmjerena ka balansu između brzine širenja vatre i procesa gorenja.

Učinak na distribuciju produkata gorenja: ovaj učinak postaje veliki problem kada su u pitanju zarobljeni radnici, posebice ako njihova lokacija nije jasna u potpunosti. Međutim, svako djelovanje mora biti istraženo koje će poboljšati atmosferske uvjete u evakuacijskim rutama.

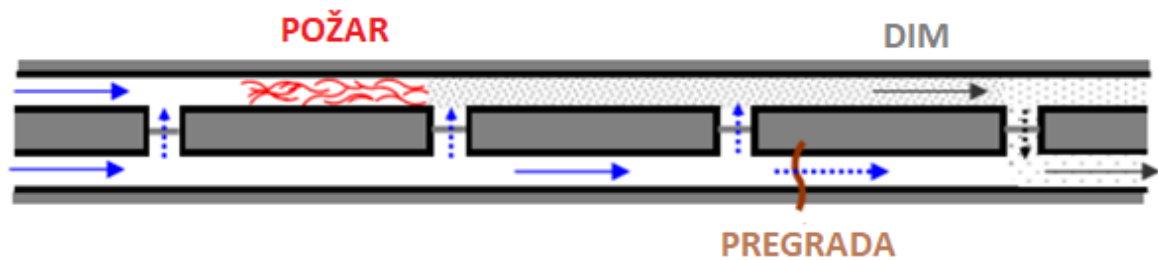
Učinak na distribuciju zračnih struja u ostale dijelove rudnika: posljedice na ventilacijski sustav u području požara su neposredna briga, dok učinak tih promjena ventilacije na ostatak rudnika mora biti predviđen, posebice u metanskim rudnicima ili dok radnici još nisu evakuirani.

Računalni model ventilacije rudnika može značajno poboljšati predviđanje učinaka promjene ventilacijskog sustava. Suvremenim analitičkim paketima, računala zaposlenika ili krizni stožer, mogu doći do predviđanja unutar par sekundi. Međutim, neizvjesnost u slučajevima požara zahtjeva stvarne promjene na sustavu ventilacije koje se polako uvode i čiji se učinci pažljivo promatraju na distribuciju i koncentraciju plinova. U sljedećim potpoglavljima će biti pojašnjene praktične primjene kontrole požara putem ventilacije.

#### 2.4.8. Kontrola tlaka

Hodnici paralelni i susjedni požarištu će ostati nezagađeni ukoliko su pod većim tlakom od atmosferskog. To omogućava evakuaciju kroz njih, te gašenje požara i podizanje pregrada u njima. U rudniku s više ulaza i hodnika, takvo postizanje tlaka je moguće podizanjem pregrada u susjednim hodnicima, kao što je prikazano na Slici 3-2. Ukoliko je potrebno, pregrade se mogu postavljati od stupa do stupa kako bi se spriječio prodor dima i štetnih plinova. U takvim okolnostima se mogu koristiti platnene ili napuhavajuće pregrade, koje u potpunosti prekrivaju obod hodnika.

Tlakovi između hodnika se također mogu kontrolirati pomoću ventilatora, umjesto ograničenja u susjednim hodnicima. U tom slučaju će protok zraka preko požara biti ograničen, te će biti izbjegnuta recirkulacija štetnih plinova pravim izborom lokacije i tlaka zraka ventilatora. Čak i male razlike u tlakovima upotrebom ventilatora će dovesti do željenog učinka.



**Slika 3-2** Primjena pregrada u kontroli štetnih plinova (prilagođeno od McPherson, 2009.)

#### 2.4.9. Okretanje zračnih struja

Mnogi rudnici po zakonu moraju imati ventilatore koji mogu izravno okrenuti smjer zračne struje. Takvi propisi su donijeti na temelju straha od širenja vatre i štetnih plinova i čestica u smjeru ulaznog okna ili hodnika. Štetni i moguće zapaljivi plinovi u tom slučaju mogu kontaminirati velik dio ventilacijskog sustava, uključujući radilišta i evakuacijske rute. Ukoliko je požar otkriven na vrijeme, brzom promjenom smjera zračne struje se može spriječiti zagađivanje zraka. U slučajevima gdje je došlo do onečišćenja cijelog ventilacijskog sustava, okretanjem zračnih struja se može dopremiti svježiji zrak do dijelova rudnika u kojima su zarobljeni radnici. Odluka o okretanju zračne struje je puna poteškoća i mora biti dovedena s velikom pažnjom.

Postoje tri metode okretanja zračnih struja, odnosno protoka zraka rudnikom. Upotreba aksijalnih rotora na glavnom ventilatoru, potom njihova promjena smjera vrtnje će dovesti do okretanja zračne struje. To može biti postignuto električnim putem na motoru ventilatora, no aksijalni ventilatori rade učinkovito samo u jednom smjeru. Lopatice tog ventilatora su dizajnirane da daju aerodinamičku stabilnost protoka zraka. Okretanjem lopatica u suprotnom smjeru dolazi do gubitaka u protoku zraka. Protok zraka u suprotnom smjeru može biti smanjen i do 50 %.

U slučaju upotrebe centrifugalnih ventilatora, okretanje zračne struje može biti postignuto pomoću preklopnih vrata. Smjer zračne struje kroz ventilator ostaje nepromjenjen. Za usisavajuće ventilatore smještene na površini rudnika, hidraulična ili pneumatska aktivacija vrata otvara ulaz ventilatora prema vanjskoj atmosferi i automatski okreće zračnu struju prema oknu ili hodniku. Za ventilatore koji upuhuju zrak je potrebno suprotno djelovanje.

U ventilacijskim sustavima rudnika je moguće projektirati sustav koji omogućava brzu promjenu smjera zračne struje u pojedinim dijelovima rudnika ili u samom hodniku, bez



promjene na glavnom ventilatoru. To je postignuto strateškim postavljanjem vrata u rudniku koja mogu biti otvarana i zatvarana kako bi se upravljalo smjerom zračnih struja.

Promjena smjera zračne struje rudnika se rijetko koristi u hitnim slučajevima jer mogu dovesti do gubitaka života radnika. U slučajevima opasnosti koje uključuju promjenu kvalitete zraka u rudniku i moguće urušavanje ventilacijskih i komunikacijskih struktura, nemoguće je sa sigurnošću znati lokacije i kretanje radnika. Okretanje zračne struje može rezultirati odvođenjem dima i štetnih plinova u područja na kojima se nalaze radnici. Rudari znaju uobičajeno kretanje zračnih struja, te promjena njihova smjera ih može dodatno dovesti u opasnost.

## 2.5. SAMOZAPALJENJE

Ukoliko je omogućeno prodiranje zraka kroz organski materijal, uključujući ugljen, doći će do podizanja temperature. Ista pojava se može uočiti u drobljenoj sulfidnoj rudi koja je uzrokovana adsorpcijom, absorpcijom i drugim kemijskim procesima. Takav proces proizvodi toplinu i dolazi do mjerljivog porasta temperature. Zrak koji prodire kroz takav materijal će ukloniti toplinu kako temperatura materijala bude rasla. Ukoliko je protok zraka dovoljno velik postiže se stabilna temperatura jer dolazi do izjednačavanja količine topline koja se proizvodi i one koja se uklanja zrakom. Međutim, ako je protok zraka dovoljno malen, postiže se oksidacijski proces u materijalu. Između ove dvije granice se nalazi opasni protok zraka koji će potaknuti spontano zagrijavanje.

Svaki materijal koji ima sposobnost samozapaljenja ima i kritičnu temperaturu znanu kao minimalna temperatura samozagrijavanja. To je najniža temperatura pri kojoj će nastati održiva egzotermna reakcija ili otpuštanje topline. Ako se dosegne minimalna temperatura samozagrijavanja prije nego se postigne toplinsko izjednačenje, tada će se ubrzati proces oksidacije. Temperatura će rapidno porasti, podupirući oksidaciju sve dok materijal ne postane usijan. U ovoj fazi, dolazi do nastanka dima i plinovitih produkata gorenja koji se pojavljuju u ventilacijskom sustavu. Rudnik tada ima prikriveni požar. Najveća opasnost pri takvom požaru je nastanak ugljičnog monoksida, zapaljenje metana i gorenje koje napreduje prema hodniku i prelazi u otvoreni požar.

### 2.5.1. Mehanizmi nastanka samozapaljenja u mineralima

Iako samozapaljenje može nastati u drobljenim sulfidnim mineralima i u rudnicima metala s drvenom podgradom, problem se najčešće pojavljuje u ugljenokopima. Istraživanje ovog područja se baziralo na samozapaljenju ugljena.

Razvoj samozagrijavanja zahtjeva velike površine drobljenog materijala u kombinaciji sa sporim kretanjem zraka kroz materijal. Nadalje, problem se javlja u jalovinama, urušenim zonama, zdrobljenim stupovima, fraktuiranom ugljenu u stropu ili podu, hrpama materijala i napuštenim dijelovima rudnika. Progresivne faze samozapaljenja su složeni procesi koji još nisu u potpunosti shvaćeni.

### 2.5.2. Faze oksidacije

Oksidacijski proces ugljena se pojavljuje u četiri faze (McPherson, 2009.)

- Fizikalna adsorpcija kisika na ugljenu pri temperaturi od  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  koja je reverzibilna, ali brzo nestaje kako temperatura poraste na  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Proces adsorpcije proizvodi toplinu kao nusprodukt promjene površinske energije materijala. To dovodi do porasta temperature.
- Kemijska absorpcija postaje značajna pri  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ono ubrzano dovodi do formiranja nestabilnih spojeva hidrokarbonata i kisika poznati kao peroksi-kompleksi.
- Pri temperaturi koja je približno jednaka temperaturi samozagrijavanja ugljena, peroksi-kompleksi se ubrzano raspadaju i proizvode kisik za daljnju fazu oksidacije. To se pojavljuje pri temperaturi od  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  s uobičajenom vrijednošću od  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . pri višim temperaturama, peroksi-kompleksi se raspadaju brže nego što nastaju i pojavljuju se plinoviti produkti kemijske reakcije kao što je ugljični monoksid i dioksid, vodena para, oksalna kiselina, aromatska kiselina i nesaturirani hidrokarbonati koji daju karakteristični miris.
- Kada temperatura poraste na  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , proces gorenja rapidno napreduje. Spaljivanje ugljena se javlja s eskalirajućim emisijama plinovitih produkata gorenja.

Adsorpcija vode znatno utječe na rane faze spontanog zagrijavanja ugljena. Znakovito je kako ugljenokopi u suhoj klimi imaju manje problema sa samozapaljenjem. Međutim, zapažena je pojava ponovnog zapaljenja ugljena pri ponovnom otvaranju nekih dijelova rudnika koji su bili poplavljeni da se ugasi požar. Ova pojava ima dva razloga. Prvo,

poplavljanje i potom drenaža mogu dovesti do dodatne dezintegracije ugljena i stvoriti nove površine. Drugo, vjerojatno viši predjeli sloja ili zarobljeni plinovi nisu u potpunosti poplavljeni i ostaju pod dovoljno visokom temperaturom (vruće točke) koja podupire adsorpciju. Kada svježi zrak ponovno uđe u sloj, ono će stvoriti vodenu paru kako napreduje kroz vlažne uvjete. To kratko hlađenje vrućih točaka će dovesti do rapidne adsorpcije vodene pare i uzrokovati rast temperature.

### 2.5.3. Sposobnost ugljena samozapaljenju

Velikim brojem istraživanja su utvrđeni potrebni uvjeti samozapaljenju ugljena i drugih materijala, kao što su:

- Petrologija i starost ugljena; mlađi i niži rang ugljena je podložniji samozapaljenju
- Razina potrošnje kisika ili porast temperature pri određenoj fazi oksidacije
- Temperatura samozagrijavanja ili druge temperature pri određenim fazama zagrijavanja
- Razine proizvodnje topline tijekom izotermalnog ili adijabatskog pokusa

Ne postoji eksperiment ili pokazatelj koji ima univerzalnu primjenu. Poteškoće se javljaju zbog toga što sposobnost samozapaljenju ne ovisi samo o materijalu, nego o fizičkom stanju i putu kretanja zračne struje kroz materijal, kao i metodi otkopavanja, te tlocrtu rudnika.

S ovolikim brojem čimbenika koji utječu na samozapaljenje je teško laboratorijskim pokusima utvrditi sposobnost materijala samozapaljenju.

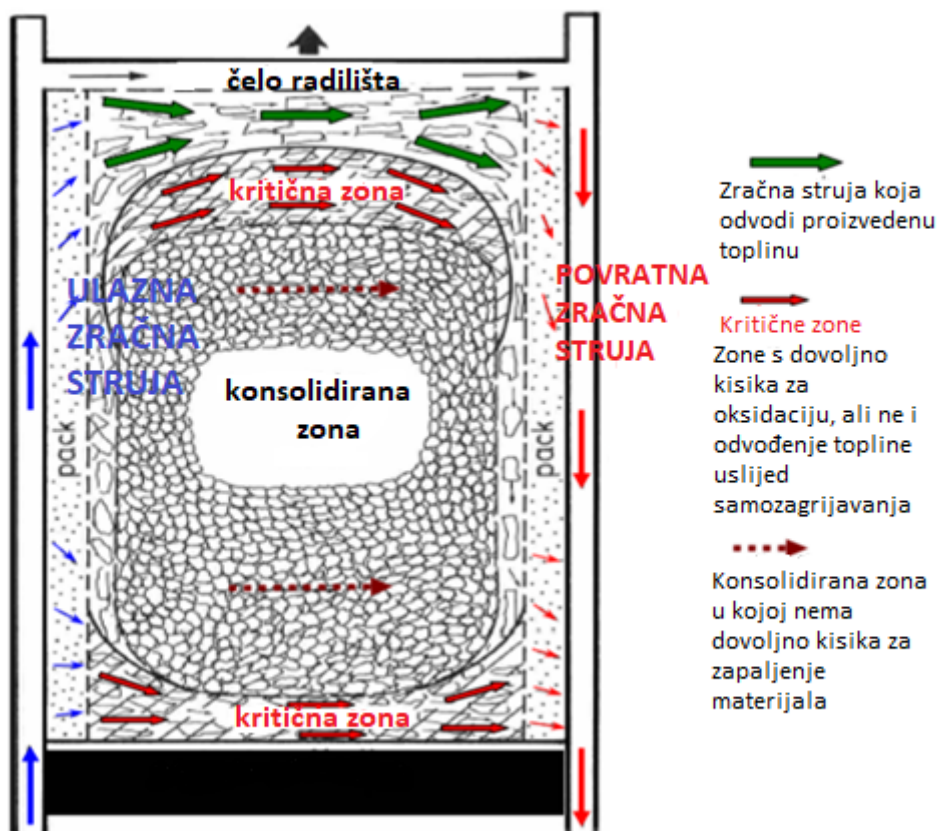
### 2.5.4. Prevencija nastanka samozapaljenja

Kao i sa svakim potencijalnim opasnostima u rudniku, tako i sa samozapaljenjem, poduzimaju se preventivne mjere u fazi planiranja i projektiranja rudnika. Jezgre rudnog tijela se pripremaju i poduzimaju se laboratorijski testovi kako bi se utvrdila sposobnost rude ka samozapaljenju. Ventilacijski sustav treba biti projektiran na način koji minimalizira diferencijalne tlakove između susjednih hodnika i duž zarušenih prostora. Prilikom projektiranja ventilacije, zračne struje moraju biti dovoljne za uklanjanje plinova ili drugih onečišćujućih tvari iz zraka s posebnim naglaskom na ograničavanje izboja metana.

Mogućnost samozapaljenja može biti ograničena smanjenjem količina ugljena, upotrebe drvene podgrade, papira, masnih krpa ili drugog zapaljivog materijala koji se odlaže u starim

radovima rudnika. Ove mjere su nemoguće ukoliko se sloj ugljena mora ostaviti zbog zaštite stropa hodnika. Također je važno označiti zone koje su potencijalno opasne, odnosno u kojima se može očekivati spontano zapaljenje. Takve zone se kontroliraju na način da se prati ima li zagrijavanja materijala, te koncentracije plinovitih produkata gorenja.

Na Slici 3-3 je prikazano strujanje zraka kroz materijal i zona u kojoj je izgledna pojava spontanog zapaljenja urušenog područja čela radilišta. Te se kritične zone pojavljuju u materijalu koji ima dovoljno kisika od zračne struje i osigurava proces oksidacije zapaljivog materijala, ali nedovoljno da ukloni toplinu brže od njenog nastajanja. Zona prikazuje nekonsolidirano područje koje dopušta strujanje zraka unutar materijala, te konsolidirano područje i čelo radilišta.



**Slika 3-3** Zona u kojoj je moguća pojava spontanog zapaljenja materijala u zarušenog područja (prilagođeno od McPherson,2009).

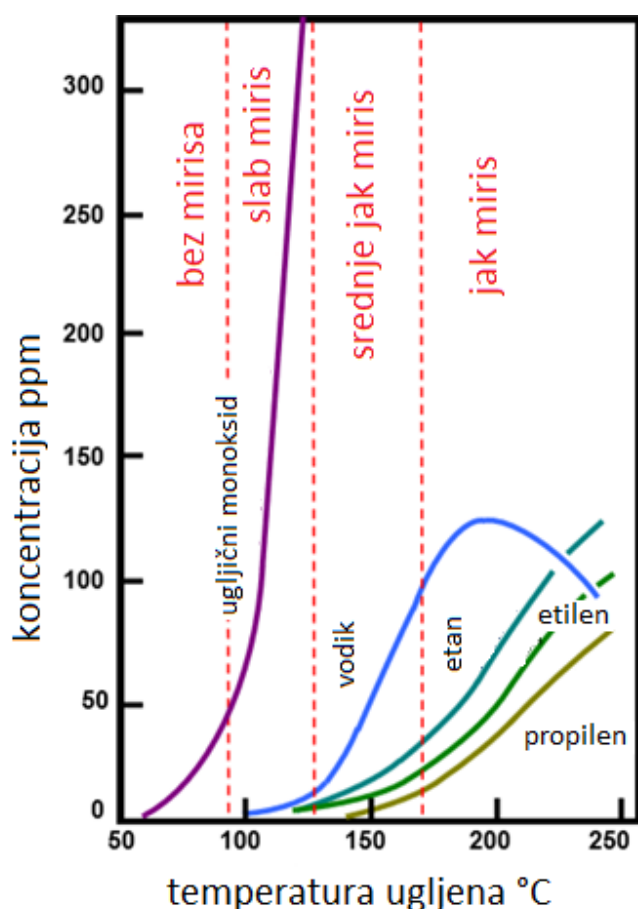
### 2.5.5. Svladavanje samozapaljenja

Postoje tri načina otkrivanja samozapaljenja u rudniku. Najstariji među njima je putem njuha, odnosno osjet karakterističnog mirisa aromatskih i nezasićenih plinova hidrokarbonata koji se otpuštaju tijekom procesa oksidacije. Taj miris se često opisuje kao miris nafte ili ulja za lampu. Uz miris se pojavljuje i vodena para koja se može uočiti u zraku

ili kao kondenzirana voda na željeznoj podgradi ili drugim površinama. U kasnijoj fazi se pojavljuje i dim.

Drugi način otkrivanja je putem termalnih uređaja koji bilježe porast temperature. Infracrvene snimke bokova hodnika su korištene kako bi se utvrdile točke emitiranja toplih plinova u zračnu struju, te propuštanje pregrada koje se koriste tijekom požara. Upotreba termalnih detektora je ograničena zbog male toplinske provodljivosti drobljenog kamena, te žica koje ne podnose mehanička oštećenja.

Najčešće korištena metoda otkrivanja je kontinuirano praćenje koncentracije plinova u izlaznoj zračnoj struji. Koncentracija plinova s porastom temperature ugljena je prikazana na Slici 3-4.



**Slika 3-4** Koncentracija plinova ovisno o temperaturi ugljena (prilagođeno od McPherson, 2009).

Postoji procedura koja bi se trebala pratiti ukoliko se otkrije spontano zapaljenje u rudniku. Prvo, detektori plinova bi trebali biti postavljeni nizvodno od zahvaćenog područja i uzorci se uzimaju u intervalu od najviše 30 minuta. Radnici moraju biti evakuirani iz područja zahvaćenog požarom, te iz rudnika ukoliko dođe do znatnog napredovanja vatre.

U isto vrijeme se moraju i označiti lokacije požara u rudniku. Lokacija se određuje prema izvoru dima i plinova, no to je teško u slučaju zarušene zone ili starih radova. Tada se pristupa praćenju koncentracije ugljičnog monoksida. Svi rezultati praćenja se ucrtavaju na kartu rudnika kako bi se utvrdile moguće lokacije požara.

Sljedeći je korak kontroliranje, odnosno gašenje takvog požara. Postoje različite metode gašenja od kojih se kao najsnažnija i najpraktičnija navodi upotreba inertnog plina prilikom otvorenog i prikrivenog požara.

Jedan od pristupa gašenju požara je njegovo iskapanje, odnosno gorućeg materijala. Ovakav pristup je moguć ukoliko se radi o manjem požaru i ako se točno zna njegova lokacija. Iskapanje se izvodi u uzvodnoj zračnoj struji kako ne bi došlo do izlaganja radnika dimu i plinovima čije se koncentracije konstantno prate tijekom požara, te hodnik mora biti ovlažen tijekom iskapanja. Također je bitno pratiti stanje stropa hodnika koji može oslabiti tijekom požara i uzrokovati urušavanje. Iskopani materijal se odvozi iz rudnika, a otkopani prostor se nakon hlađenja zatrpava inertnim materijalom kao što je prašina vapnenca ili gipsa, kako bi se spriječilo ponovno zapaljenje.

U nekim je slučajevima moguće ograničiti dotok zraka požaru, tako što se požarište zakopa urušenom krovinom. Zatrpavanje požara, odnosno urušavanje krovine na lokaciju požara je efektivno ukoliko se požar otkrije dovoljno rano sa detektorima plina, prije pojave dima.

Velik broj pregrada postavljenih u hodnicima, među stupovima, na križanjima hodnika kako bi kontrolirali tlak ventilacijskog sustava, također ograničavaju dotok zraka požaru. Osim pregrada koji se postavljaju na vanjskim površinama, postoje i brtvila koja se utiskuju u stijenu. Brtvila od betona i gipsa mogu biti nanoseni brzo i efektivno na površinu hodnika, kao i injektirani u stijenu gdje imaju svrhu brtve između zapaljenog materijala i prodora zraka unutar materijala. Emulzije na bazi vode se također koriste u injektiranju iz podzemnih prostorija ili pomoću bušotine s površine rudnika. Injektiranje natrijeva silikata u zaštitne stupove ugljena se pokazalo efektivno prilikom samozapaljenja.

Ovakvi požari se mogu kontrolirati i putem balansiranja tlaka u zahvaćenoj zoni. Ukoliko ne postoji diferencijalnih tlakova u zoni koja je zahvaćena samozapaljenjem, tada ni ne može biti protoka zraka kroz materijal. Takva kontrola zahtjeva povećanje pritiska na povratnoj strani zračne struje, odnosno smanjenje pritiska na ulaznoj strani zračne struje kako bi se protok zraka kroz materijal ograničio. Ovakav pristup ima primjenu u starim radovima rudnika ili u požarima jalovine bez da se ta područja brtve.

Još jedan od načina svladavanja samozapaljenja je potapanje požarišta. Ukoliko se požar nalazi u blizini sadašnjih rudarskih radova, onda je olakšan pristup za potapanje. Drugi pristup je potapanje područja požara s viših etaža rudnika, prilikom čega voda prodire do vatre i čini gotovo savršeno brtvljenje požarišta od prodora zraka. Potapanju se nikako ne pristupa ukoliko postoji i najmanja šansa spašavanja zarobljenih radnika.

## **2.6. UPOTREBA PREGRADA I KONTROLE TLAKA U SLUČAJU POŽARA I EKSPLOZIJA**

U rudarstvu je raširena upotreba pregrada prilikom požara i eksplozija, kako u preventivne svrhe, tako i sa svrhom svladavanja širenja požara. Razlikujemo dvije vrste pregrada, a to su privremene pregrade koje predstavljaju lagane i jednostavne strukture od platna ili nekih drugih tkanina i materijala koje ne mogu izdržati značajnije opterećenje. Pregrade koje se nazivaju trajnima su zidovi građeni od cigli, betonskih blokova, vreća s pijeskom, metalnih ploča, i to u jednom ili više slojeva.

Pregrade imaju i ulogu kontrole ventilacije kako bi se spriječili gubitci u protoku zraka i usmjerile zračne struje. S druge strane, pregrade koje su privremene ili trajne, nisu otporne na eksplozije, te se očekuje kako će biti uništene u takvim slučajevima. U slučajevima požara, pregrade imaju ulogu reguliranja zračnih struja oko područja zahvaćenog vatrom i sprječavanje kontaminacije plinovima drugih dijelova rudnika.

Postoje i pregrade koje su otporne na eksplozije i one se postavljaju kada se metode gašenja požara pokažu neučinkovitim, te kada su gotove akcije spašavanja. Njihova uloga je sprječavanje prodora zraka na područje požara kako bi se stvorila inertna atmosfera i njegovo gašenje. Postavljanje takvih pregrada je u slučajevima kada se požari otmu kontroli i ne postoji drugi način njegova svladavanja, no pregrade se mogu otvoriti u slučajevima spašavanja opreme kada se požar stavi pod kontrolu.

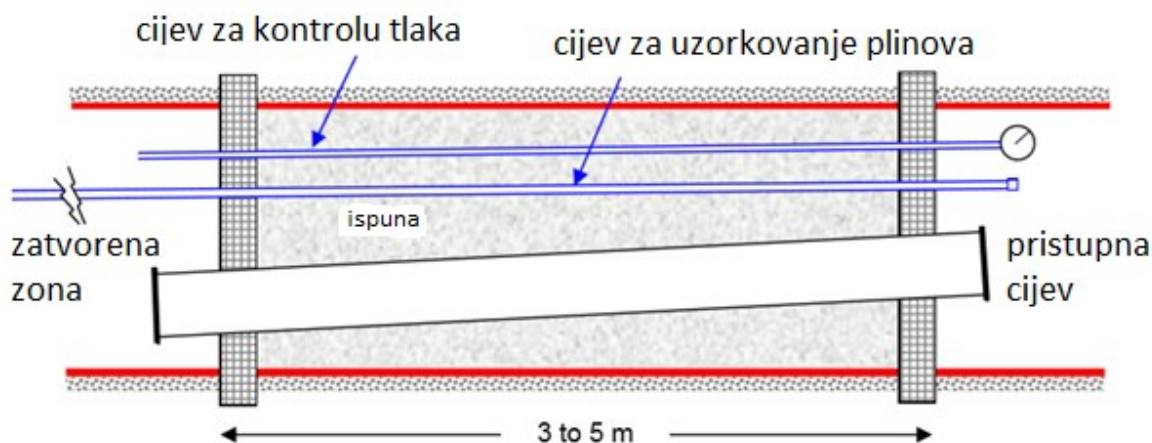
Odabir lokacije postavljanja pregrade se vrši na način da se zatvore svi pristupi području zahvaćenom požarom. Prilikom postavljanja se moraju uzeti u obzir i bušotine koje dopiru do površine, kao i cjevovodi jer u plićim rudnicima mogu dovesti do oštećivanja struktura na površini. Nadalje, lokacije trebaju biti odabrane na način koji minimizira broj potrebnih pregrada. Trebali bi postojati skladišta materijala za građenje pregrada koje su planirane u

fazi projektiranja rudnika kako bi se omogućilo što brže postavljanje pregrada. Također, pregrade moraju biti postavljene u hodnicima koji imaju sigurnu podgradu i stabilne zidove i strop.

Prilikom postavljanja pregrada se mora voditi računa o sigurnosti radnika koji ju postavljaju. Radnici moraju imati dovod svježeg zraka, a ukoliko je atmosfera zagađena produktima izgaranja, tada je neophodna upotreba samospasioca. Gdje postoji opasnost od eksplozija ili izboja plinova, lokacija pregrade mora biti odabrana na način da se omogućuje brzi bijeg radnika. Jasno je kako je teško odabrati lokaciju pregrade koja zadovoljava sve tražene zahtjeve, no treba se voditi sigurnošću radnika i optimalne pozicije koja će dovesti do gašenja požara.

Eksplozije koje se pojavljuju tijekom požara uzrokuju porast tlaka većeg od 350 kPa koji su izmjereni kod eksplozije metana, stoga je važno da pregrade koje se smatraju otporne na eksploziju, izdrže te velike dinamičke pritiske. Na Slici 3-5 je prikazana tipična pregrada građena od cigle ili betonskih blokova između kojih se nalazi nezapaljiva ispuna. Duljina pregrade, odnosno ispune, je računana po formuli (3-1) te na Slici 3-5 iznosi 3 do 5 metara. Također, prilikom izračuna u obzir se mora uzeti stanje okolne stijene i tipa ispune, te se kao minimalna debljina uzima 3 m. (McPherson, 2009).

$$\frac{\text{Širina hodnika} + \text{visina}}{2} + 0.6 \quad (3.1)$$



**Slika 3-5** Pregrada otporna na eksploziju (prilagođeno od McPherson, 2009).

Prilikom građenja ovakve pregrade u ugljenokopu, koristi se kamena prašina ispred same pregrade koja sprječava širenje eksplozije do zida pregrade. Suhi materijali kao što su

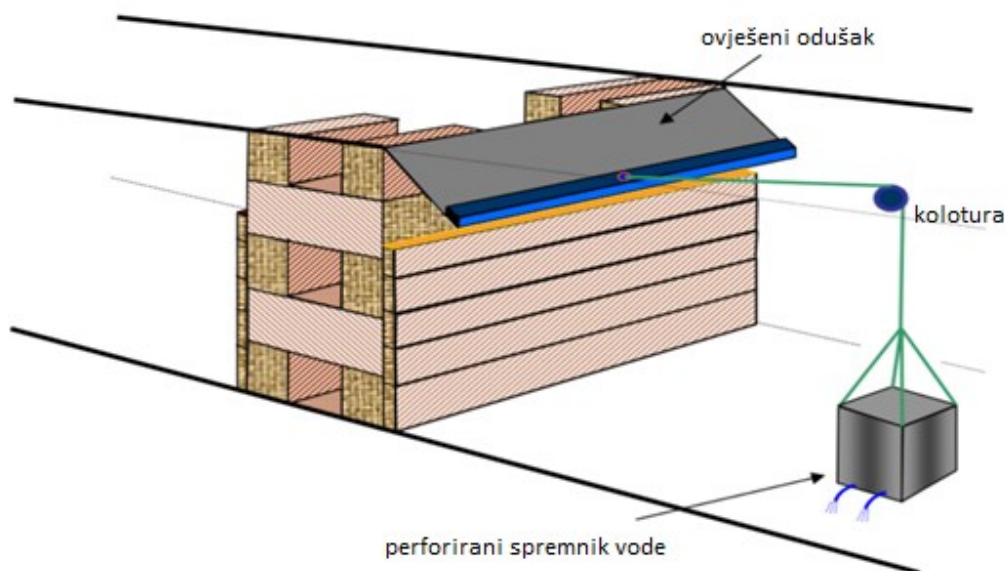


pijesak, kamena prašina ili leteći pepeo koji se mogu koristiti kao ispuna, no bolji izbor je gips. Takva ispuna se upumpava između zidova kao tekući materijal koji prodire u sve pukotine i čini okolnu stijenu cementiranom.

Također se upotrebljavaju cijevi za uzorkovanje zagađene atmosfere i mjerenje tlaka iza pregrade. Cijevi u kojima se nalaze mjerni instrumenti bi trebali biti dugi bar 30 metara kako bi se dobile stvarne vrijednosti tlaka na području požara.

Metalna cijev prikazana na Slici 3-5 omogućuje pristup zraka prilikom postavljanja pregrade. S druge strane usporava širenje požara bogatog gorivom i smanjuje rizik od eksplozije dok su radnici još na radilištu. Također omogućuje pristup spasilačkim timovima sa samospasiocima na požarište kako bi utvrdili stanje požara. Kada je pregrada postavljena, cijev se zatvara na oba kraja kako bi pregrada bila nepropusna i radnici moraju napustiti rudnik na 24 sata ili nakon što je uspostavljena inertna atmosfera.

Naime, glavna mana ovakvog tipa pregrade je vrijeme potrebno za postavljanje. U slučaju otvorenog požara u ugljenokopima ili u prostorijama s drvenom podgradom, svladavanje takvog požara zahtjeva brzu reakciju. Iz tog razloga je dizajnirana pregrada s poklopcem za smanjenje pritiska, odnosno oduškom i naziva se ventilirana pregrada. Na Slici 3-6 je prikazana takva pregrada izgrađena od drvenih greda i prišivenih dasaka na koje je pri vrhu ovješeni odušak od komada transportne trake i koji je napet pomoću spremnika vode. U slučaju opasnosti, spremnik se probija i svi radnici napuštaju opasno područje. Odušak se zatvara kada je spremnik ispražnjen.



**Slika 3-6** - Pregrada s oduškom (prilagođeno od McPherson, 2009).

Ovakav tip pregrade može izdržati eksplozivna pulsiranja manjeg intenziteta i tako predstavlja privremenu zaštitu dok se ne postavi trajna pregrada.

## 2.7. Plinoviti produkti požara (gorenja)

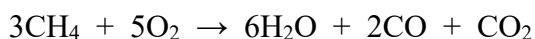
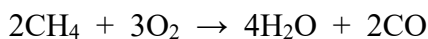
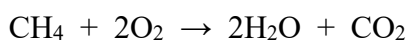
Prilikom požara u podzemnim prostorijama, ovisno o materijalu koji izgara, otpuštaju se štetni plinoviti produkti. Osim putem ljudskih osjetila, nastali plinovi se detektiraju praćenjem kvalitete zraka u rudniku koji predstavlja osnovnu metodu opažanja požara ili samozapaljenja. Uzorkovanjem zračne struje nizvodno od požara ili iz pregrađenog područja se može ustanoviti ponašanje požara i njegovo napredovanje, prilikom čega se prati atmosfera u rudniku koja može postati eksplozivna. Plinoviti produkti variraju u svojim koncentracijama s različitim fazama oksidacije, vremena i temperature i važno ih je pravilno interpretirati.

Prilikom izgaranja ugljena ili drvene građe, događaju se sljedeći procesi (McPherson,2009):

- Destilacija plinova iz čvrstog materijala
- Oksidacija čvrstog materijala na svojoj površini i emisija topline i svjetlosti
- Izgaranje zapaljivih plinova koji su produkt prethodno navedenih procesa, prilikom čega dio topline podupire daljnju destilaciju.

Plinoviti produkti izgaranja i njihove količine ovise o udjelu navedenih procesa. Plinovi nastali destilacijom ugljena su ugljični monoksid, ugljični dioksid, vodik i vodena para, kao i metan, te ostali plinovi ugljikovodika. Drvena građa destilacijom otpušta iste plinove, iako je količina vodika neznatna. Kada nastupi izgaranje, zapaljivi plinovi gore stupnjem koji ovisi o dostupnosti kisika u zraku. Krajnja smjesa plinova požara je rezultat plinova destilacije i širenja vatre koja dovodi do požara bogatog gorivom.

Složenost procesa nastanka ovakvih smjesa plinova može se prikazati kroz nekoliko načina izgaranja metana:



Nadalje, u daljnjim reakcijama se može proizvesti vodena para i daljnja redukcija ugljičnog dioksida u ugljični monoksid.

Sa svrhom detektiranja plinova požara, uzorkovana atmosfera rudnika se sastoji od zraka, zapaljivih plinova i inertnih plinova kao što su dušik i ugljični dioksid. Zapaljivi plinovi se javljaju u slučajevima zagrijavanja ugljena, odnosno pojave samozapaljenja s ograničenom dostupnosti kisika. Jedan od prvih i očitih indikatora požara je ugljični monoksid. Međutim, pojava saturiranih ugljikovodika kao što je etilen, ukazuju na gorenje ugljena. Kako se požar

razvija u otvoreni požar, tako se pojavljuje sve veći broj plinovitih produkata, kao što je i ugljični dioksid koji stvaraju onečišćujuću atmosferu rudnika.

Tijekom podzemnih požara, mora biti osigurano kontinuirano praćenje koncentracije plinova ili analiza uzetih uzoraka atmosfere rudnika. Prilikom razvoja požara u požar bogat gorivom, pojavljuje se opasnost od nastanka eksplozivne smjese plinova koja će napredovati dalje od zone požara. Nadalje, ukoliko je zona požara pregrađena i zabrtvljena, dolazi do porasta koncentracije zapaljivih plinova i pada koncentracije kisika što te smjese plinova dovodi u granice eksplozivnosti. Slična opasnost se pojavljuje i pri ponovnom otvaranju zatvorenih zona požara i dostupnosti kisika. Stoga je od velike važnosti poznavati granice zapaljivosti i eksplozivnosti plinova i njihovih smjesa.

U Tablici 3.1. su prikazane donje i gornje granice zapaljivosti plinova prisutnih u rudnicima, te trokut eksplozivnosti, odnosno postotak u smjesi sa inertnim plinovima i kisikom koji tu smjesu čini eksplozivnom. U većini slučajeva, zapaljivi plin koji se pojavljuje je metan koji u smjesi s kisikom i inertnim plinovima čini eksplozivnu smjesu.

**Tablica 3-1** Granice zapaljivosti i eksplozivnosti plinova u rudnicima, (McPherson, 2009).

| Plin              | Granice zapaljivosti, % |        | Granice zapaljivosti u smjesi, % |       |
|-------------------|-------------------------|--------|----------------------------------|-------|
|                   | Donja                   | Gornja | Plin                             | Kisik |
| Metan             | 5,0                     | 14,0   | 5,9                              | 12,2  |
| Ugljični monoskid | 12,5                    | 74,2   | 13,8                             | 6,1   |
| Vodik             | 4,0                     | 74,2   | 4,3                              | 5,1   |

### 3. EKSPLOZIJE U PODZEMNIM KOPOVIMA

Gotovo nijedna rudarska industrija u svijetu nije izbjegla havarije i traume uzrokovane požarima i eksplozijama u rudnicima. Visoka je opasnost za ljudske živote kod ovakvih nesreća što je predmet ovog rada, te je ovaj problem statistički obrađen u daljnjim poglavljima.

Do ozljeda i fatalnih posljedica uslijed eksplozija dolazi zbog udarnog vala, gorenja i visokih koncentracija ugljikovog monoksida poslije detonacije. Nažalost, od samo jedne detonacije mogu stradati stotine radnika, pa je tako najveća zabilježena nesreća u rudarskoj industriji ona u rudniku Honkieko, Mandžurija (1942.), regije u Kini, gdje je nastradalo i život izgubilo preko 1500 rudara (Wikipedia, 2017.).

#### 3.1. Uzroci eksplozija

Eksplozija se može definirati kao izuzetno brza kemijska reakcija praćena praskom, oslobađanjem velike količine topline i naglim povećanjem volumena zbog stvaranja plinovitih produkata. U slučaju eksplozije smjese metana i zraka, postižu se temperature do 2000 °C, dok su moguće i više temperature s drugim komponentama.

Kako bi došlo do eksplozije, moraju biti prisutne tri navedene komponente trokuta eksplozivnosti: zapaljiva tvar, kisik i izvor paljenja. Međutim, postoje i daljnji uvjeti za detonaciju, zapaljivi materijal može biti plin ili fino raspršena prašina u zraku, te u koncentracijama koje se nalaze između donje i gornje granice zapaljivosti.

U većini podzemnih eksplozija je glavni uzrok paljenje metana, te jedan od najopasnijih slučajeva. Osim samog paljenja, do velikih posljedica dolazi prilikom uzdizanja zapaljive prašine udarnim valom koja se može zapaliti gorućim metanom. To sve rezultira eksplozijom prašine koja je razornija od samog metana. Zapaljenje metana u većini slučajeva rezultira plavim plamenom koji se prostire duž smjese sa zrakom, bez razvoja eksplozije. Do eksplozije dolazi uslijed turbulencija i podizanja prašine ili velike topline unutar komponentata trokuta eksplozije koji zapaljenje ubrzavaju do eksplozije.

Fino raspršena prašina svakog zapaljivog materijala može postati eksplozivna, uključujući metalnu prašinu, sulfidnih ruda i većinu prašina organskog materijala. U proizvodnji i skladištenju moraju biti poduzete mjere opreza radi sprječavanja nakupljanja takvih prašina, uključujući i proizvodnju hrane. Uzroci požara su već prethodno navedeni, te oni svi mogu dovesti do eksplozija, pa tako eksplozivnu smjesu može zapaliti električna iskra sa energijom od samo 0,3 mJ.

### 3.1.1. Eksplozije plinova

Najčešće eksplozije u rudarstvu su povezane s metanom iz ugljena. Takve eksplozije se osim u rudnicima mogu pojaviti i u skladištima ugljena, te na brodovima koji ga prevoze. Kod manevriranja ugljenom, izmjerene su koncentracije do 40 % metana, prilikom čega dolazi do miješanja metana i zraka u smjesu koja može postati eksplozivna. Kod takvih radnji moraju biti poduzete mjere opreza kao što su praćenje koncentracije metana, dobar ventilacijski sustav skladišta, izdvajanje svih izvora paljenja, zabrana pušenja, te dostupnost sredstava za gašenje požara.

Osim metana, česte su i eksplozije vodika u stanicama za punjenje akumulatora, te eksplozije para goriva iz strojeva. Međutim, eksplozijama u rudnicima je i dalje najveći uzrok metan. Suvremeni ventilacijski sustavi su sposobni kontroliranju koncentracija metana, no njegove koncentracije u ugljenu mogu doseći i 90 %, stoga je jasno kako između emisije metana i zračne struje ipak dolazi do stvaranja eksplozivne smjese.

Kako bi se spriječilo paljenje metana, s radilišta moraju biti uklonjeni svi izvori paljenja, te ukoliko je potrebno, ugrađene prskalice vode koji obaraju opasnu ugljenu prašinu. Također, brzina zračne struje mora biti dostatna sprečavanju nakupljanja metana na radilištu ili se metan može prethodno drenirati iz ugljena.

### 3.1.2. Eksplozije ugljene prašine

Opasnost od eksplozije ugljene prašine ovisi o čimbenicima kao što su:

#### 1) Koncentracija prašine i prisutnost metana

Plamen zapaljene prašine je rezultat gorenja svake čestice prašine zasebno, stoga će plamen biti veći što je veća koncentracija čestica prašine, odnosno što su čestice bliže jedna drugoj. Ukoliko su dovoljno daleko jedna od druge, plamen će biti nedovoljan da se proširi. S druge strane, ako su čestice preblizu, neće biti dovoljno prostora za kisik koji podržava gorenje. Donja granica zapaljivosti je pri koncentraciji od  $50 \text{ g/m}^3$  s maksimalnom eksplozivnosti pri koncentraciji  $150 \text{ g/m}^3$  do  $350 \text{ g/m}^3$ , ovisno o sadržaju volatila u ugljenu (McPherson, 2009). Pri takvoj koncentraciji se stvara zagušujuća atmosfera u rudniku. Gornja granica zapaljivosti po nekim autorima je i do  $5000 \text{ g/m}^3$  (McPherson, 2009), no ovisno o dostupnosti kisika. Granice zapaljivosti za respirabilnu prašinu mogu se kretati oko 2 miligrama po kubičnom metru. Takva stanja se teško mogu postići s modernim ventilacijskim sustavima, no

opasnost je i u prašini nataloženoj na površinama kao što su transportne trake koja može stvoriti eksplozivnu atmosferu prilikom uzdizanja i miješanja sa zrakom.



**Slika 4-1** - Eksplozija ugljene prašine u testnoj prostoriji (Du Plessis, J.J.L. 2015.)

Eksplozivnost metana i ugljene prašine je u svojevrsnoj sinergiji. Zapaljivost jedne od te dvije komponente ovisi o prisutnosti obje. Također zapaljivost ugljena ovisi i o sadržaju volatila.

## 2) Finoća prašine

Nije puno radova obrađeno oko poveznica finoće prašine, odnosno veličine čestica i eksplozivnih svojstava. Međutim, povećana površina reakcije je postignuta manjom veličinom čestica, te eksplozivnost raste kako se veličina čestica smanjuje. Prihvaćeno je mišljenje kako svaka zapaljiva prašina koja je podignuta u zrak, može biti eksplozivna, a to su čestice promjera do 250 mikrona.

## 3) Tip ugljena

Dokazano je kako je ugljena prašina eksplozivnija s porastom sadržaja volatila u ugljenu. (McPherson, 2009). Ugljeni nižeg ranga, odnosno njihova prašina, je sklonija zapaljenju. Prašina antracita se smatra neeksplozivnom u normalnim uvjetima rudnika. S druge strane, prašina ugljena s niskim sadržajem volatila s dovoljno

energije iniciranja može izazvati velike eksplozije. Razorna eksplozija u Mandžuriji (1942.), koja je ranije spomenuta, se dogodila u rudniku ugljena sa sadržajem volatila od 15 % do 19 %.

#### 4) Snaga izvora iniciranja eksplozije

Energija izvora paljenja, odnosno iniciranja eksplozije, igra veliku ulogu u eksplozivnosti prašine. Većina eksplozija ugljene prašine je bila inicirana zapaljenjem metana koji je proizveo udarni val koji diže prašinu i zapaljuje ju. Međutim, svaki izvor paljenja dostatne energije u prisutnosti zapaljivog plina i prašine može izazvati eksploziju, pa su tako zabilježeni slučajevi eksplozija prašine koja je inicirana upotrebom zabranjenog eksploziva.

Do eksplozije ugljene prašine dolazi njenim podizanjem uslijed udarnog vala koji može biti potaknut plamenom frontom deflagacije koja je sporija od samog vala. Plamen brzine od 50 m/s će proizvesti udarni val brzine 375 m/s. (McPherson, 2009). Slučajevi eksplozija ugljene prašine i metana pokazuju kako brzina plamena raste brže od samog udarnog vala pri čemu postižu brzine i do 1100 m/s. To pospješuje reakciju u detonaciju što dovodi do adijabatskih tlakova u udarnom valu koji povećavaju temperaturu pri čemu udarni val i plamena fronta postižu brzine i do 2000 m/s.

#### 3.1.3. Eksplozije sulfidne prašine

Iako su eksplozije sulfidne prašine opasnost u rudnicima metala, oni nemaju razornu moć kao ugljena prašina. Ovakve eksplozije se iniciraju prilikom miniranja rude koja sadrži više od 40 % sumpora. Glavna opasnost kod sulfidnih ruda je stvaranje otrovnog sumpornog dioksida. Nadalje, plin reagira s vodenom parom što uzrokuje koroziju i stvaranje para sumporne kiseline. Iz navedenih razloga se prilikom miniranja sulfidnih ruda koristi voda prije i tijekom miniranja.

### 3.2. Suzbijanje eksplozija

Primarna zaštita od eksplozija je dobro projektiran i vođen ventilacijski sustav, redovno održavana oprema i uredno vođenje radilišta na način da se sprječava nakupljanje zapaljive

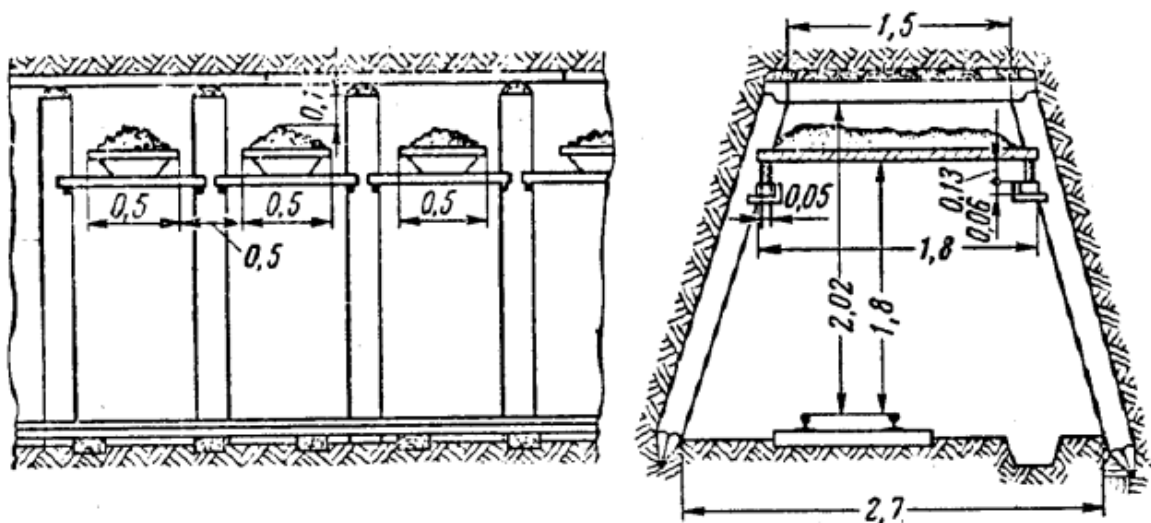
prašine i radilište na kojemu je osigurana upotreba kamene prašine za slučaj eksplozije, što je jedna od najraširenijih metoda suzbijanja eksplozije.

### 3.2.1. Upotreba kamene prašine i vodenih barijera

Fina prašina vapnenca pomiješana s ugljenom prašinom ima dvije uloge u hodnicima. Prvo, služi kao inertno sredstvo, odnosno razrjeđivač smjese koja lebdi u zraku, na način da povećava međusobnu udaljenost zapaljivih čestica. Drugo, čestice kamene prašine apsorbiraju toplinu i sprječavaju zapaljenje ugljene prašine. Ukoliko se omogući dostatna količina kamene prašine, navedenim načinima se može spriječiti razvoj eksplozije.

Važno je da kamena prašina bude dobro pomiješana s ugljenom, te da je kamena prašina dobro raspoređena po podzemnim prostorijama. Međutim, zapaljiva prašina na transportnim trakama može izazvati eksploziju čak i kada je kamena prašina raspoređena po prostoriji. Prašina se može jednoliko raspoređivati po prostoriji ako se kontroliranim protokom dodaje u zračnu struju, te se taloži zajedno sa zapaljivom prašinom, tvoreći uniformnu smjesu.

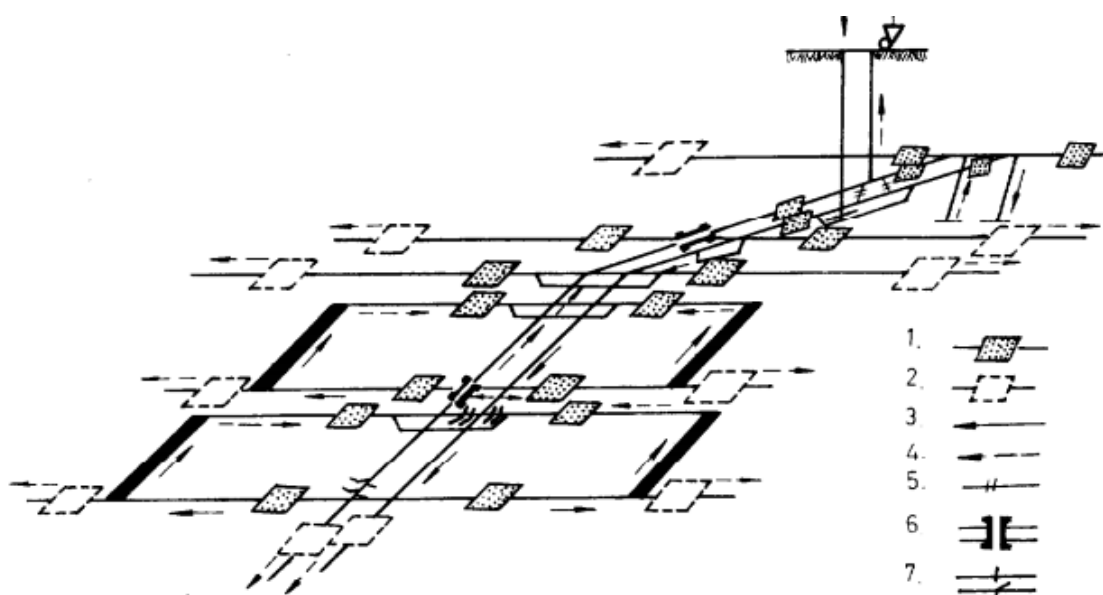
Postoji druga metoda apliciranja kamene prašine, posebice u rudnicima s jednim ulazom i otkopnom metodom širokog čela, koja uključuje barijere kamene prašine. Takve barijere su jednostavne građe, a sastoje se od drvenih dasaka koje podupiru stupovi kao što je prikazano na Slici 4-1. Na daskama je natovarena kamena prašina čija težina varira između 30 i 60 kilograma po dužnom metru daske. Svrha barijera je da se prašina rasprši djelovanjem udarnog vala prilikom eksplozije, te se na taj način stvori visoka koncentracija prašine koja sprječava razvoj plamene fronte.



Slika 4-2 Konstrukcija barijera kamene prašine u hodniku (Jovičić i dr., 1987).



Smještaj barijera mora biti pomno odabran. Ukoliko su preblizu potencijalnom mjestu eksplozije, odnosno čelu radilišta, tada može doći do razvoja plamene fronte prije nego se prašina adekvatno distribuira po zraku. S druge strane, ukoliko je predaleko, kamena prašina se može previše disperzirati po zračnoj struji prije nailaska plamene fronte. Najčešće rješenje, prikazano na Slici 4-2. je postavljanje barijere težine 30 kg/m, na 200 m od čela radilišta, te druge barijere koje su više natovarene na veću udaljenost. Barijere kamene prašine se također postavljaju duž transportnih traka.



**Slika 5.44. Plan razmještaja kamenih brana u rudniku**  
 1 – glavne kamene brane; 2 – sporedne kamene brane; 3 – svježa vazдушna struja; 4 – istrošena vazдушna struja; 5 – pregrada; 6 – ventilacioni most; 7 – ventilaciona vrata.

**Slika 4-3** Razmještaj barijera kamene prašine u rudniku (Jovičić i dr., 1987).

Barijere imaju i nedostatke kao što je vlaga u stropu hodnika koja veže prašinu i ona gubi svoja svojstva. Također prašinu mogu raspršiti turbulencije uzrokovane radom strojeva ili miniranja. Barijere kamene prašine su učinkovite pri ranoj fazi eksplozije, no ne mogu suzbiti velike eksplozije, kao ni eksplozije metana.

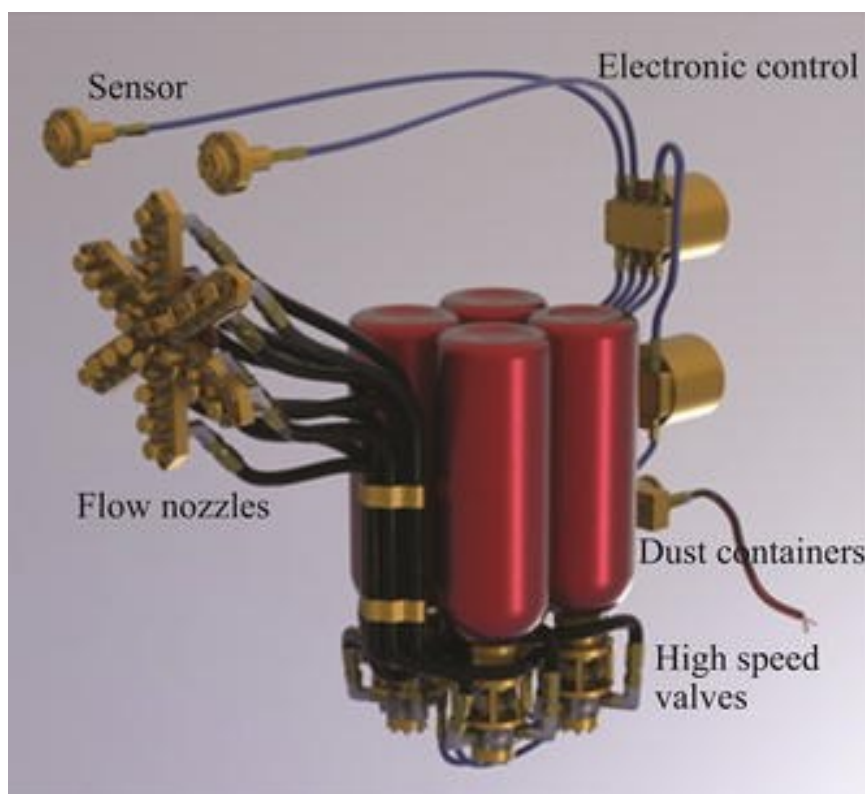
Vodene barijere imaju istu ulogu kao kamena prašina. U ovom slučaju se upotrebljavaju spremnici od polistirena ili nekog drugog slabijeg materijala, napunjenih s 40 do 90 litara vode koji su postavljeni na stropu hodnika. Spremnici s vodom se raspadnu pri udarnom valu koji putuje brzinom 100 m/s, te se voda rasprši pri čemu suzbija razvoj plamene fronte efektom hlađenja i zamjene kisika.

### 3.2.2. Aktivirajuće barijere i detektori eksplozija

Barijere kamene prašine i vode imaju nedostatak što se njihova aktivacija oslanja samo na udarni val eksplozije koji ih raspršuje. Aktivirajuće barijere su projektirane s unutarnjim izvorom energije. Uobičajeni dizajn uključuje spremnik vode spojen na sustav prskalice duž hodnika. Membrana koja zadržava vodu u spremniku sprječava protok vode ka prskalicama pri normalnim uvjetima rada. Spremnik dušika ili ugljičnog dioksida pod tlakom je smješten u spremnik vode, te sadrži ventil koji se aktivira pod pritiskom.

Prilikom aktivacije, grijač unutar spremnika plina uzrokuje naglo širenje plina i otvaranje ventila. To uzrokuje veliki tlak u spremniku vode, puknuće membrane, te distribuciju vode pod velikim pritiskom kroz prskalice. Nekoliko stotina litara vode može biti raspršeno u jednoj sekundi. Neki proizvođači koriste praškaste materijale za suzbijanje plamene fronte, umjesto vode, kao što je model na Slici 4-4.

Aktivacija barijere je pokrenuta električnim signalom detektora eksplozije koji je smješten u blizini radilišta, odnosno potencijalnog mjesta eksplozije. Infracrveni, ultraljubičasti, senzori temperature i tlaka se koriste kao detektori eksplozija.



**Slika 4-4** Aktivirajuća barijera za suzbijanje eksplozije (International Journal of Coal Science & Technology, 2015.)

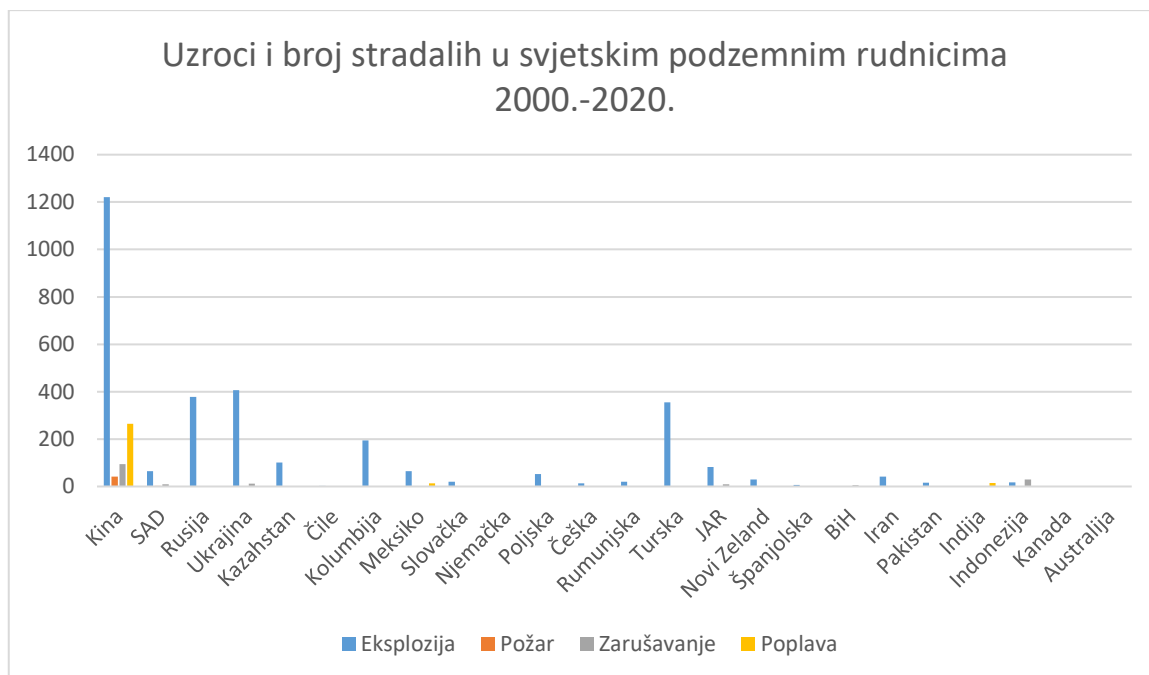
#### 4. PREGLED POŽARA I EKSPLOZIJA PO RUDNICIMA

Dok se u suvremenoj rudarskoj praksi upotrebljava sve više napredne tehnologije i metoda otkopavanja, uz strože uvjete sigurnosti radnika, zabilježen je pad smrtnih stradanja, no nesreće se i dalje događaju. Kroz ovaj pregled nesreća u bližoj povijesti rudarstva je vidljiv isti obrazac uzroka nesreća, te zemlje u kojima se one događaju. Kina, zemlja koja drži više od trećine svjetske proizvodnje ugljena, nažalost drži i dvije trećine smrtno stradalih rudara svake godine. Kina je prva u svijetu po broju stradalih, te zemlja u kojoj je zabilježena najveća nesreća u povijesti rudarstva.

U pokrajini Mandžuriji, godine 1942., dogodila se tragedija u rudniku ugljena u kojemu je život izgubilo preko 1500 rudara. Uzrok je bio jedan od najčešćih uzoraka koji je vidljiv i u ovome pregledu, a to je eksplozija metana i ugljene prašine. Tijekom nesreće je ugašen ventilacijski sustav i zatvoren ulaz kako bi se spriječio dotok kisika koji bi podupirao daljnji razvoj požara, no uzrokovao je još jedan od najčešćih uzroka smrti u rudnicima, a to je trovanje ugljičnim monoksidom (Wikipedia, 2017.).

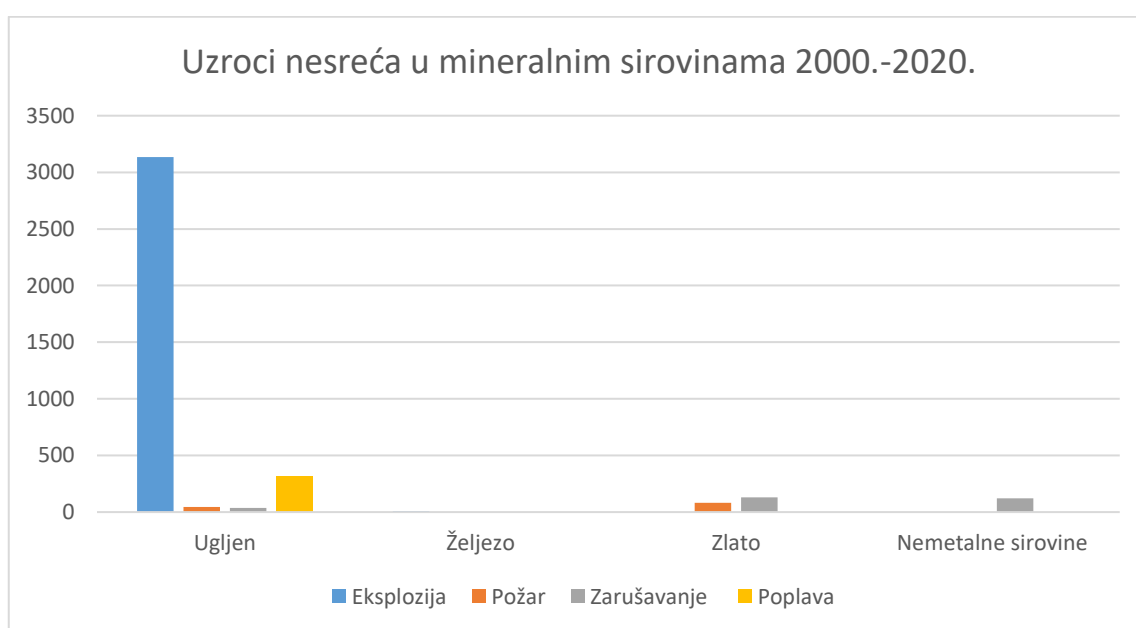
Kroz pregled nesreća je vidljivo kako je najveći broj smrtno stradalih rudara zabilježen u zemljama u razvoju, s druge strane su zabilježene i nesreće u zemljama koje predvode u rudarskoj proizvodnji i imaju najviše standarde sigurnosti radnika.

Pregledom nesreća su statistički obrađene nesreće u rudarstvu po godini kada su se odvile, lokaciji rudnika, brojem smrtno stradalih, te kratkim opisom nesreća, odnosno uzrokom nesreće. Sljedeći dijagrami su rezultati te obrade u kojima je vidljivo kretanje broja smrtno stradalih tijekom posljednjih 20 godina.



**Slika 5-1** Dijagram smrtno stradalih u rudarskim nesrećama

Statističkom obradom nesreća u rudnicima tijekom razdoblja 2000.-2020. je utvrđen ukupan broj smrtno stradalih koji iznosi 3880 žrtava. Na Slici 5-1. je vidljivo kako u broju stradalih prednjače zemlje koje su i najveći proizvođači određenih mineralnih sirovina, posebice ugljena. Pa tako je najviše stradalih u Kini, Rusiji, Ukrajini, te Turskoj. Također su to zemlje koje se uslijed velike proizvodnje nedovoljno pridržavaju zakonske regulative po pitanju sigurnosti.



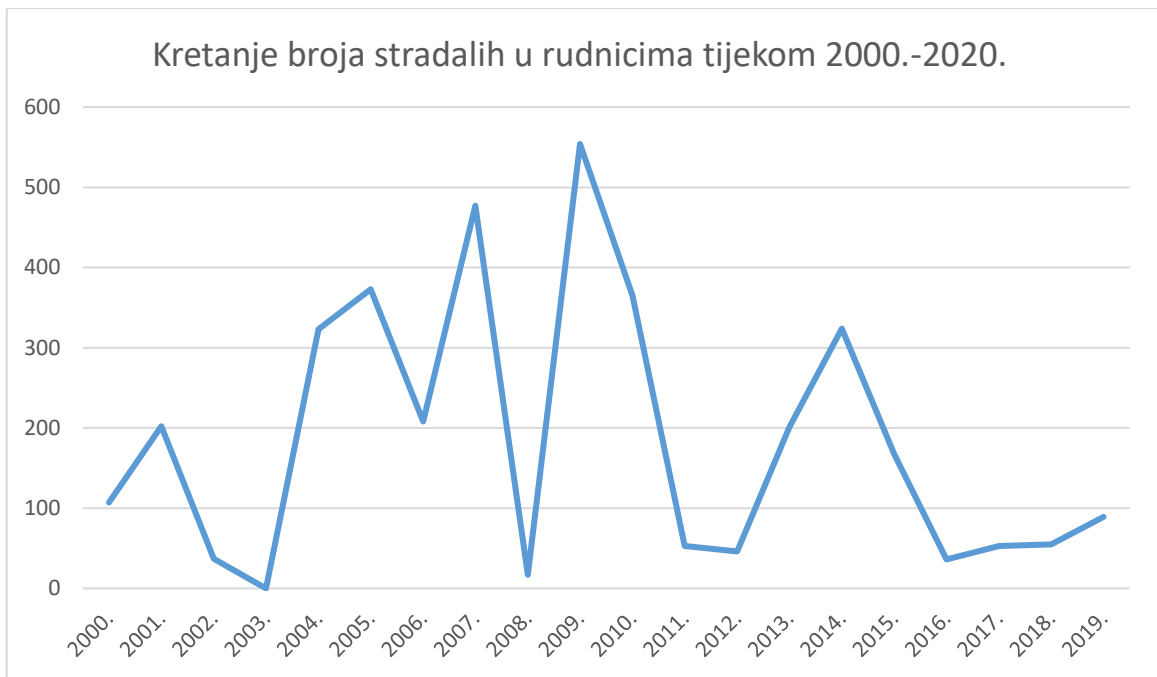
**Slika 5-2** Dijagram smrtno stradalih po uzrocima nesreća

Na Slici 5-2. je vidljivo kako je glavni uzrok nesreća koji je tijekom navedenog razdoblja odnio najviše ljudskih žrtava zasigurno eksplozija čiji uzroci, prevencija i svladavanje zauzimaju velik dio ovoga rada.



**Slika 5-3** Dijagram smrtno stradalih u pojedinim mineralnim sirovinama

Na Slici 5-2., te Slici 5-3. su prikazani uzroci nesreća i mineralne sirovine u kojima se najviše događaju nesreće, te je vidljivo kako su glavni uzrok eksplozije koje se najvećim dijelom događaju u ugljenokopima, s ukupnim brojem smrtno stradalih od 3530. U radu su navedeni uzroci eksplozija koji ugljenokope svrstavaju u opasna radna okruženja zbog stalne prisutnosti zapaljivih plinova i prašine. U Prilogu 1. je sadržana cijela statistička obrada nesreća, te se nalaze opisi nesreća u drugim mineralnim sirovinama čiji su uzroci neprimjereno rukovanje eksplozivima, poplave u rudnicima, zarušavanja prostorija, itd.



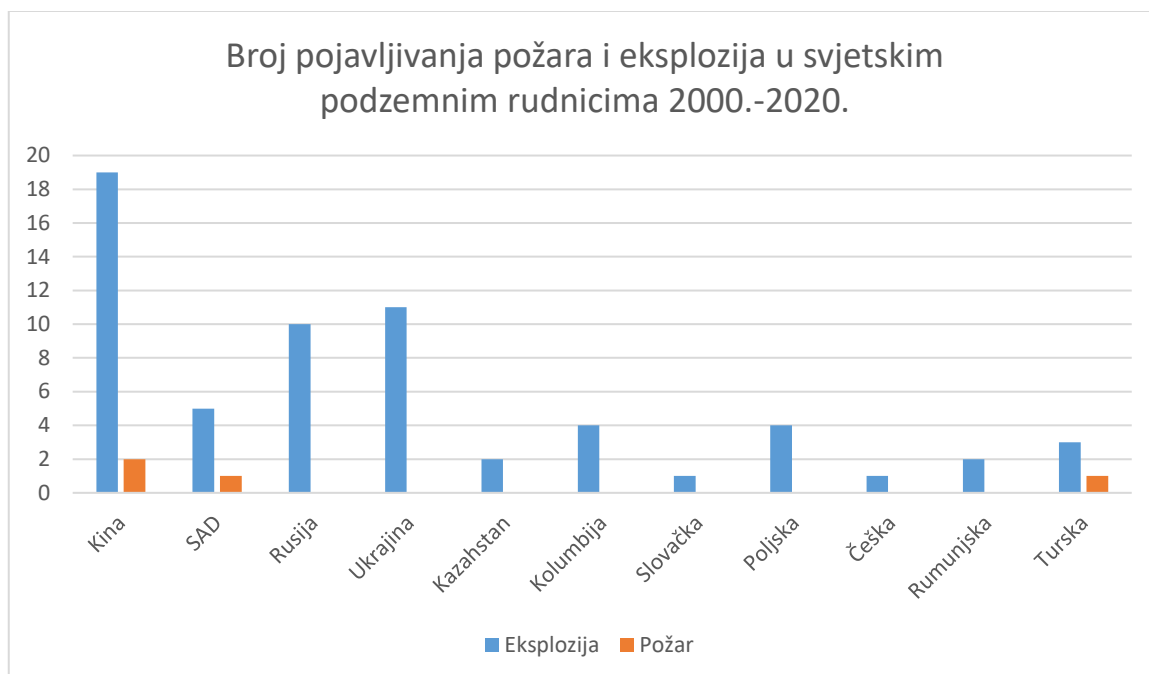
**Slika 5-4** Dijagram kretanja broja smrtno stradalih u rudnicima



**Slika 5-5** Dijagram kretanja broja pojavljivanja požara i eksplozija u rudnicima

Tijekom posljednjih 20 godina je zabilježeno 3880 smrtnih slučajeva u rudarskim nesrećama, čiji se broj smanjuje s modernizacijom proizvodnje, no kako je prikazano na Slici 5-4. i Slici 5-5, i dalje su prisutne pojave požara i eksplozija u rudarskoj proizvodnji, te variraju ovisno od godine do godine. Za razliku od posljednjih godina kada je

pojavljivanje požara i eksplozija u stagnaciji, godine 2006. do 2010. izuzev 2008., su bile kritične po broju njihova pojavljivanja i po ljudskim žrtvama.



**Slika 5-6** Dijagram pojavljivanja požara i eksplozija u rudnicima

Zemlje koje su vodeće u proizvodnji ugljena su po prethodnim dijagramima u vrhu po broju stradalih u nesrećama, isto tako je vidljivo kako imaju najveći broj pojavljivanja požara i eksplozija u rudnicima po Slici 5-6. Ponavljaju se iste države s velikim brojem žrtava kao što su Kina, Rusija, Ukrajina, Turska i SAD.



**Slika 5-7** Dijagram pojavljivanja požara i eksplozija u mineralnim sirovinama

Kako je već navedeno u prethodnim poglavljima, usprkos razvoju metoda eksploatacije i upotrebe novih tehnologija, pojava požara i eksplozija nije isključena. Tako je na dijagramima pojave požara i eksplozija po svjetskim rudnicima i u pojedinim mineralnim sirovinama, na Slici 5-6. i Slici 5-7., vidljivo kako njihova pojava varira posljednjih godina, te kako ugljen i dalje predstavlja najopasnije područje naše struke.



## 5. ZAKLJUČAK

Požari i eksplozije su opasnosti koje su u suvremenom rudarstvu sveprisutne, stoga se ulažu velika sredstva i naponi u istraživanje, zaštitu, prevenciju, te njihovo svladavanje. Takve opasnosti se ne događaju često, no kao posljedicu imaju velike materijalne gubitke i tragične ishode, opasne po život rudara, ali i trenutno ili trajno oštećenje rezervi mineralnih sirovina.

Pojava požara i eksplozija u podzemnoj eksploataciji se ne smanjuje usprkos razvoju metoda eksploatacije, praćenja utjecaja eksploatacije na okoliš, te kontrole potencijalnih opasnosti. Opasnosti u rudarstvu se nažalost pojavljuju i radi ljudskog faktora, odnosno radi prioriteta kompanija u pogledu sigurnosti i zaštite na radu, te ekonomije koja diktira sve veću potražnju za mineralnim sirovinama.

U ovome radu su opisane sve opasnosti koje se pojavljuju u podzemnoj eksploataciji, te njihovi uzroci, prevencije, načini svladavanja eksplozija i požara. Koristeći programe Office paketa, statistički su obrađene nesreće podzemne eksploatacije u svijetu tijekom razdoblja između 2000. – 2020. U posljednjih 20 godina je kroz ovaj pregled ustanovljeno 3880 smrtno stradalih rudara, od kojih je najveća većina stradala od požara i eksplozija u ugljenokopima, što čini 3530 žrtava, odnosno 91 % svih stradalih.

Najveći dio nesreća se odvio u zemljama u razvoju, odnosno zemljama koje se velikim dijelom oslanjaju na fosilna goriva kao što je ugljen, te imaju njihovu najveću proizvodnju. Tako velika proizvodnja je nažalost na uštrb sigurnosti, te dovodi do katastrofalnih posljedica i u novijoj povijesti. Zemlje kao što su Kina, Rusija, Ukrajina, Turska su visoko na ljestvici broja nesreća i smrtno stradalih rudara, te pojavljivanju požara i eksplozija u rudnicima što je vidljivo kroz ovaj rad i pregled nesreća, no pojava nesreća nije isključena ni u najrazvijenijim državama svijeta.

U konačnici, ovaj diplomski rad i pregled nesreća može poslužiti kao upozorenje u budućem radu u okruženju podzemne eksploatacije jer postoje mnogi čimbenici koji utječu na sigurnost i rizike koji mogu biti reducirani, ali nikad u potpunosti eliminirani.

## 6. LITERATURA

DU PLESSIS, J.J.L. 2015. Active explosion barrier performance against methane and coal dust explosions. International journal of coal science and technology. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007> (16.12.2019.)

McPHERSON, M.J. 2009. Subsurface ventilation engineering. 2<sup>nd</sup> edition. Fresno: Mine ventilation services Inc.  
URL: <https://mvsengineering.com/index.php/downloads/publications> (26.11.2019.)

MINERS. 2019. Training handbook – mine rescue operations. Leoben: Montan Universitat

JOVIČIĆ V., MILJKOVIĆ M., NUIĆ J., ULJIĆ H., VUKIĆ M. 1987. Sigurnost i tehnička zaštita u rudarstvu. Tuzla: Univerzitetska knjiga.

NIOSH, 2017. Historical mine disasters. The national institute for occupational safety and health. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/statistics/minedisasters.html> (16.12.2019.)

WIKIPEDIA. 2010. 21st – century mining disasters. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Category:21st-century\\_mining\\_disasters](https://en.wikipedia.org/wiki/Category:21st-century_mining_disasters) (2.12.2019.)

WIKIPEDIA. 2020. Liste von Unglücken im Bergbau. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_von\\_Unglueken\\_im\\_Bergbau#2001\\_bis\\_heute](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Unglueken_im_Bergbau#2001_bis_heute) (7.1.2020.)

ZNR. 2018. Osnove zaštite od požara. Zaštita na radu. URL: <https://zastitanaradu.com.hr/kategorije/zastita-od-pozara> (7.1.2020.)

PREVENTA. 2019. GHS piktogrami opasnosti. Preventa plus d.o.o. URL: <https://znakovisigurnosti.eu/ghs-piktogrami-opasnosti.html> (29.1.2020.)

**Prilog 1.** Tablica nesreća u rudnicima tijekom 2000. – 2020.

| Godina | Naziv rudnika     | Država     | Vrsta sirovine | Uzrok              | Broj stradalih | Opis   |
|--------|-------------------|------------|----------------|--------------------|----------------|--|
| 2019.  | Bolaang Mongondow | Indonezija | Zlato          | Urušavanje         | 29             | Puknuće i urušavanje potpornih struktura okna                      |
| 2019.  | Hpakant           | Mijanmar   | Žad            | Urušavanje         | 6              | Aktivirano klizište koje je uzrokovalo urušavanje                  |
| 2019.  | Guanglong         | Kina       | Ugljen         | Eksplozija         | 14             | Eksplozija metana  |
| 2019.  | Pingyao           | Kina       | Ugljen         | Eksplozija         | 15             | Eksplozija metana  |
| 2019.  | Shidkarbon        | Ukrajina   | Ugljen         | Eksplozija         | 19             | Eksplozija metana  |
| 2018.  | Meghalaya         | Indija     | Ugljen         | Poplava            | 15             | Prodiranje vode iz susjednog poplavljenog hodnika                  |
| 2018.  | Karvina           | Češka      | Ugljen         | Eksplozija         | 13             | Eksplozija metana  |
| 2018.  | Quetta            | Pakistan   | Ugljen         | Eksplozija         | 16             | Eksplozija metana  |
| 2018.  | Shandong          | Kina       | Ugljen         | Gorski udar        | 11             | Stradanje rudara od padajućeg kamenja uslijed gorskog udara        |
| 2017.  | Zemestan-Yurt     | Iran       | Ugljen         | Eksplozija plinova | 42             | Eksplozija plinova uslijed pokretanja lokomotive putem akumulatora |

|       |                    |          |        |                     |     |  |
|-------|--------------------|----------|--------|---------------------|-----|--|
| 2017. | Stepowa            | Ukrajina | Ugljen | Eksplorzija         | 11  | Eksplorzija metana   |
| 2016. | Vorkuta            | Rusija   | Ugljen | Eksplorzija metana  | 36  | Tri eksplorzije metana koje su dovele do urušavanja djela rudnika i povećane koncentracije ugljičnog monoksida   |
| 2015. | Hpakant            | Mijanmar | Žad    | Klizište jalovine   | 116 | Nepoznat uzrok pokretanja klizišta jalovine rudnika žada, uslijed pretrage jalovišta za preostalim kamenjem žada   |
| 2015. | Liaoning           | Kina     | Ugljen | Požar               | 17  | Eksplorzija metana   |
| 2015. | Zasyadko           | Ukrajina | Ugljen | Eksplorzija plinova | 34  | Eksplorzija zapaljivih plinova od nepoznatog uzroka  |
| 2014. | Raspotočje, Zenica | BiH      | Ugljen | Gorski udar         | 5   | Urušavanje hodnika uslijed potresa jačine 3,5 po Richteru  |
| 2014. | Ermenek            | Turska   | Ugljen | Poplava             | 18  | Poplava podzemnih prostorija uslijed puknuća cijevi  |
| 2014. | Eynez, Soma        | Turska   | Ugljen | Požar i eksplorzija | 301 | Požar uslijed eksplorzije čiji uzrok nije definiran. Požar se pojavio prilikom smjene radnika čija je smrt nastupila uslijed povećane koncentracije ugljičnog monoksida. |

|       |                          |            |              |                              |    |  |
|-------|--------------------------|------------|--------------|------------------------------|----|--|
| 2013. | Babao                    | Kina       | Ugljen       | Eksplorzija                  | 53 | Dvije eksplozije unutar rudnika iz nepoznatih razloga u razmaku od tri dana        |
| 2013. | Pozo Emilio del Valle    | Španjolska | Ugljen       | Izboj plinova                | 6  | Izboj metana   |
| 2013. | Kallwerk Werra           | Njemačka   | Kalijeva sol | Trovanje ugljičnim dioksidom | 6  | Trovanje ugljičnim dioksidom u visokoj koncentraciji poslije miniranja.            |
| 2013. | Gyama                    | Kina       | Zlato        | Klizište                     | 83 | Gubitak stabilnosti kosine uslijed zasićenja vodom poslije velike količine snijega |
| 2013. | Machang                  | Kina       | Ugljen       | Eksplorzija                  | 25 | Eksplorzija plinova i ugljene prašine  |
| 2013. | Taozigou                 | Kina       | Ugljen       | Eksplorzija                  | 28 | Eksplorzija uslijed ilegalnog rudarenja ugljena bez ventilacijskog sustava.        |
| 2012. | Xiaojiawan               | Kina       | Ugljen       | Eksplorzija                  | 46 | Eksplorzija plinova i urušavanje okna.   |
| 2011. | Suhodolskaya-Vostochnaya | Ukrajina   | Ugljen       | Eksplorzija                  | 26 | Eksplorzija metana   |
| 2011. | Bazhanova                | Ukrajina   | Ugljen       | Kolaps dizala                | 2  | Kolaps dizala unutar okna rudnika zbog "nemara u radu".                            |
| 2011. | La Preciosa              | Kolumbija  | Ugljen       | Eksplorzija                  | 21 | Eksplorzija metana   |

|       |                   |             |        |                          |    |   |
|-------|-------------------|-------------|--------|--------------------------|----|---|
| 2011. | Gleision Colliery | Wales       | Ugljen | Poplava                  | 4  | Prodiranje vode uslijed rutinske operacije miniranja čela radilišta.  |
| 2010. | San Jose, Copiapó | Čile        | Bakar  | Urušavanje               | 0  | Spašeno svih 33 zarobljenih rudara nakon 69 dana. Akciju spašavanja provodila Čileanska vlada, NASA i deseci svjetskih rudarskih kompanija. |
| 2010. | San Fernando      | Kolumbija   | Ugljen | Eksplorzija              | 73 | Eksplorzija metana  |
| 2010. | Dongxing          | Kina        | Ugljen | Požar                    | 25 | Požar električnih instalacija u rudniku.  |
| 2010. | Luotuoshan        | Kina        | Ugljen | Poplava                  | 32 | Prodor vode u prostorije iz vodonosnika u okolni vapnenačkim stijenama.   |
| 2010. | Pike River        | Novi Zeland | Ugljen | Eksplorzija              | 29 | Četiri eksplozije metana unutar par dana.   |
| 2010. | Raspadaskaya      | Rusija      | Ugljen | Eksplorzija i urušavanje | 90 | Eksplorzija metana koja je dovela do urušavanja ventilacijskog okna i stradanja rudara.   |
| 2010. | Krasnogorskaja    | Rusija      | Ugljen | Eksplorzija              | 1  | Eksplorzija metana  |
| 2010. | Upper Big Branch  | SAD         | Ugljen | Eksplorzija              | 29 | Eksplorzija metana i ugljene prašine.   |

|       |               |          |         |            |    |   |
|-------|---------------|----------|---------|------------|----|---|
| 2010. | Wangjialing   | Kina     | Ugljen  | Poplava    | 37 | Prodiranje podzemne vode na najdonje horizonte u kojima su bili rudari.   |
| 2010. | Yuanyang      | Kina     | Ugljen  | Eksplozija | 21 | Urušavanje rudarskih prostorija uslijed eksplozije prilikom koje su korišteni ilegalni, odnosno nedopuštena eksplozivna sredstva. |
| 2010. | Zonguldak     | Turska   | Ugljen  | Eksplozija | 28 | Eksplozija metana u ugljenokopu.  |
| 2009. | Chongqing     | Kina     | Ugljen  | Eksplozija | 30 | Eksplozija zapaljivih plinova.  |
| 2009. | Estjuninskaja | Rusija   | Željezo | Eksplozija | 9  | Iniciranje eksploziva tijekom transporta na 180 metara dubine   |
| 2009. | Kirow         | Ukrajina | Ugljen  | Eksplozija | 8  | Eksplozija nepoznatog uzroka  |
| 2009. | Skotschinsky  | Ukrajina | Ugljen  | Eksplozija | 11 | Eksplozija metana i ugljene prašine   |
| 2009. | Dompoase      | Gana     | Zlato   | Urušavanje | 18 | Urušavanje ilegalnog rudnika zlata uslijed pokrenutog klizišta.   |
| 2009. | Handlova      | Slovačka | Ugljen  | Eksplozija | 20 | Požar unutar istočnog okna koji je pokrenuo eksploziju zapaljivih plinova u   |

|       |              |                        |         |             |     |   |
|-------|--------------|------------------------|---------|-------------|-----|---|
|       |              |                        |         |             |     | drugom djelu rudnika.   |
| 2009. | Harmony Gold | Južnoafrička Republika | Zlato   | Požar       | 82  | Smrt rudara trovanjem otrovnim plinovima uslijed požara u oknu.                 |
| 2009. | Rustenburg   | Južnoafrička republika | Platina | Zarušavanje | 9   | Zarušavanje prostorije  |
| 2009. | Heilongjiang | Kina                   | Ugljen  | Eksplozija  | 108 | Eksplozija zapaljivih plinova koji su nakupljeni zbog loše ventilacije rudnika. |
| 2009. | Henan        | Kina                   | Ugljen  | Eksplozija  | 76  | Eksplozija metana u ugljenokopu.  |
| 2009. | Shanxi       | Kina                   | Ugljen  | Eksplozija  | 74  | Eksplozija metana i trovanje ugljičnim monoksidom.                              |
| 2009. | Henan        | Kina                   | Ugljen  | Eksplozija  | 42  | Eksplozija nepoznatog uzroka  |
| 2009. | Jinzhong     | Kina                   | Ugljen  | Eksplozija  | 11  | Eksplozija nepoznatog uzroka  |
| 2009. | Bezirk       | Indonezija             | Ugljen  | Eksplozija  | 17  | Eksplozija plinova  |
| 2009. | Wujek-Śląsk  | Poljska                | Ugljen  | Eksplozija  | 20  | Eksplozija metana 1 kilometar ispod površine u bitumenoznom ugljenu.            |
| 2009. | Devecikonagi | Turska                 | Ugljen  | Eksplozija  | 19  | Urušavanje podzemnih prostorija uslijed   |



|       |                 |           |        |            |     |   |
|-------|-----------------|-----------|--------|------------|-----|---|
|       |                 |           |        |            |     | eksplozije metana   |
| 2008. | Petrila         | Rumunjska | Ugljen | Eksplozija | 13  | Eksplozija metana u ugljenokopu.  |
| 2008. | Borynia         | Poljska   | Ugljen | Eksplozija | 4   | Eksplozija metana   |
| 2008. | Karl Marx       | Ukrajina  | Ugljen | Urušavanje | 12  | Eksplozija plinovoda koja je dovela do urušavanja rudarskih prostorija.                         |
| 2007. | Crandall Canyon | SAD       | Ugljen | Urušavanje | 9   | Urušavanje djela rudnika na 457 m dubine koje je izazvalo seizmičku aktivnost na uređajima.     |
| 2007. | Gameza          | Kolumbija | Ugljen | Eksplozija | 8   | Eksplozija plinova  |
| 2007. | La Preciosa     | Kolumbija | Ugljen | Eksplozija | 32  | Eksplozija plinova  |
| 2007. | Shandong        | Kina      | Ugljen | Poplava    | 181 | Poplava dva okna rudnika nakon što je nabujala rijeka probila nasip.                            |
| 2007. | Ulyanovskaya    | Rusija    | Ugljen | Eksplozija | 108 | Eksplozija metana i ugljene prašine koja je inicirana iskrom oštećenih električnih instalacija. |
| 2007. | Yubileynaya     | Rusija    | Ugljen | Eksplozija | 38  | Eksplozija metana zbog oštećenih električnih instalacija.                                       |

|       |                           |            |        |            |     |   |
|-------|---------------------------|------------|--------|------------|-----|---|
| 2007. | Zasyadko                  | Ukrajina   | Ugljen | Eksplzija  | 101 | Eksplzija metana uslijed loših sigurnosnih uvjeta rudnika.  |
| 2006. | Vladimir Lenjin           | Kazahstan  | Ugljen | eksplzija  | 41  | Eksplzija metana na dubini od 620 m.  |
| 2006. | Halemba                   | Poljska    | Ugljen | Eksplzija  | 23  | Eksplzija metana i ugljene prašine.   |
| 2006. | Kreis Caras Severin       | Rumunjska  | Ugljen | Eksplzija  | 7   | Eksplzija plinova   |
| 2006. | Aracoma Alma              | SAD        | Ugljen | Požar      | 2   | Požar u rudniku uslijed zapaljenja transportne trake. Gusti dim je zapriječio izlazak hodnikom.                 |
| 2006. | Beaconsfield              | Australija | Zlato  | Urušavanje | 1   | Urušavanje rudarskih prostorija na dubini od jednog kilometra uslijed potresa.                                  |
| 2006. | Carola-Augustina, Copiapo | Čile       | Bakar  | Eksplzija  | 2   | Eksplzija nastala sudarom dva kamiona u rudniku, te zaprječivanje izlaza za rudare.                             |
| 2006. | Darby                     | SAD        | Ugljen | Eksplzija  | 5   | Eksplzija metana u ugljenokopu.   |
| 2006. | Nanshan Colliery          | Kina       | Ugljen | Eksplzija  | 24  | Eksplzija zapaljivih plinova uslijed pogrešne upotrebe eksploziva. Rudnik nije imao valjanu sigurnosnu licencu. |

|       |                  |           |                     |                   |     |   |
|-------|------------------|-----------|---------------------|-------------------|-----|---|
| 2006. | Odakoy           | Turska    | Ugljen              | Eksplozija        | 17  | Eksplozija metana na dubini od 150 m.   |
| 2006. | Pasta de Conchos | Meksiko   | Ugljen              | Eksplozija        | 65  | Eksplozija metana.  |
| 2006. | Sago             | SAD       | Ugljen              | Eksplozija        | 12  | Urušavanje rudarskih prostorija zbog eksplozije metana.   |
| 2006. | Darby            | SAD       | Ugljen              | Eksplozija        | 5   | Eksplozija plinova  |
| 2006. | Sullivan         | Kanada    | Olovo, cink, srebro | Nedostatak kisika | 4   | Istraživanje u zatvorenom rudniku koje je dovelo do smrti dva znanstvenika i dva bolničara uslijed nedostatka kisika. |
| 2005. | Sunjiawan        | Kina      | Ugljen              | Eksplozija        | 214 | Eksplozija plinova par minuta nakon potresa koji je pogodio područje na kojemu je rudnik.                             |
| 2005. | Dongfeng         | Kina      | Ugljen              | Eksplozija        | 134 | Eksplozija plinova  |
| 2005. | Essaulskaja      | Rusija    | Ugljen              | Eksplozija        | 25  | Eksplozija plinova  |
| 2004. | Schachtinskaja   | Kazahstan | Ugljen              | Eksplozija        | 60  | Eksplozija plinova  |
| 2004. | Chenjiashan      | Kina      | Ugljen              | Eksplozija        | 166 | Eksplozija plinova  |

|       |                |          |        |            |     |  |
|-------|----------------|----------|--------|------------|-----|--|
| 2004. | Kusbass        | Rusija   | Ugljen | Eksplozija | 13  | Eksplozija plinova   |
| 2004. | Krasnolymanska | Ukrajina | Ugljen | Eksplozija | 37  | Eksplozija plinova   |
| 2004. | Taischina      | Rusija   | Ugljen | Eksplozija | 47  | Urušavanje prostorija uslijed eksplozije plinova                                 |
| 2002. | La Espuela     | Meksiko  | Ugljen | Poplava    | 13  | Poplava rudarskih prostorija nakon što su rudari probušili u poplavljeni hodnik. |
| 2002. | Donezk         | Ukrajina | Ugljen | Eksplozija | 20  | Eksplozija plinova   |
| 2002. | Jasmos         | Poljska  | Ugljen | Eksplozija | 5   | Eksplozija nepoznatog uzroka   |
| 2001. | Sassjadko      | Ukrajina | Ugljen | Eksplozija | 39  | Eksplozija plinova   |
| 2001. | Shaanxi        | Kina     | Ugljen | Eksplozija | 150 | Eksplozija uslijed nepropisnog rukovanja eksplozivom u ilegalnom rudniku.        |
| 2001. | Brockwood      | SAD      | Ugljen | Eksplozija | 13  | Eksplozija plinova   |
| 2000. | Komsomolez     | Rusija   | Ugljen | Eksplozija | 12  | Eksplozija plinova   |
| 2000. | Barakowa       | Ukrajina | Ugljen | Eksplozija | 81  | Eksplozija plinova   |

|       |             |      |        |         |    |                                   |
|-------|-------------|------|--------|---------|----|-----------------------------------|
| 2000. | Dahuangshan | Kina | Ugljen | Poplava | 14 | Prodor vode u rudničke prostorije |
|-------|-------------|------|--------|---------|----|-----------------------------------|