

Nenad Todorović¹
Edin Deli²
Rijad Šišić³
Edisa Nukić⁴

Originalni naučni rad

KINEMATSKA ANALIZA UTICAJA DINAMIKE NAPREDOVANJA ŠIROKO ELSNIH OTKOPA NA SPONTANU OKSIDACIJU UGLJA

Sažetak: Dimenzije, oblik i dinamika napredovanja široko elnih otkopa su jedan od najuticajnijih faktora na pojavu antropogenih podzemnih požara u rudnicima uglja. Praćenjem tehničko-tehnoloških parametara, eksperimentalnim mjerenjem i računarskom simulacijom analizirani su uticaji kinematike i dinamike napredovanja više različitih široko elnih otkopa. U radu su analizirani međusobni uticaji tri različitih široko elna otkopa u specifičnim uslovima otkopavanja i visokom opasnosti od pojave oksidacionih procesa. Predstavljen je aktivni sistem upravljanja rizicima Rudnika „Podzemna eksploatacija“ RMU Banovići i pomoć u modelu detekcije ventilacionih hazarda i procjene rizika u skladu sa međunarodnim standardima i praksom u vrlo specifičnim uslovima eksploatacije sa tri široka elna i različitim tehnologijama otkopavanja u neposrednoj blizini otkopa. Rudnik „Podzemna eksploatacija“, u ranijem periodu poznat kao jama „Omazići“, već dugi niz godina otkopava uglj jedinственом radinskom široko elnom metodom. Zbog velike mase nosi ugljenog sloja vrši se troslojno otkopavanje, a između pojedinih slojeva ostavljaju se zaštitne metalne mreže, kako bi se kvalitetnije kontrolisalo zarušavanje krovine pri otkopavanju nižih slojeva. Nakon višedecenijskih pokušaja za uvođenje mehanizovanog otkopavanja u podzemnom rudniku u Banovićima novo mehanizovano široko elno pokazalo je bolje rezultate nego što su to imali raniji pokušaji. Rad na mehanizovanom širokom elu odvijao se paralelno sa radom dva klasična široka elna, i to na način da je evidentan međusobni ventilacioni uticaj široko elnih otkopa.

Od ratnog perioda do 2013. godine dobijanje uglja na širokom elu vršilo se klasičnim miniranjem i ručnim utovarom na grabuljasti transporter, a podgrađivanje uglavnog frikcionom podgrađom koja je zahtijevala težak fizički rad i diktirala male proizvodnje u inke. Tokom 2013. godine postepeno se uvodi mehanizovano široko elno, koje radi paralelno sa dva konvencionalna široka elna. Zbog velike dinamike napredovanja mehanizovanog elna i rada dva široka elna otkopa u neposrednoj okolini, dolazi do povećane požarne opasnosti i moguće interakcije ova dva otkopa.

U radu je izvršena analiza međusobne kinematike i dinamike napredovanja širokih elna, te njihov uticaj na požarnu opasnost. Dat je prikaz registrovanih pojava oksidacionih procesa, njihove karakteristike i iskustva. Snimljeni su aerodinamički parametri i požarne karakteristike postojećeg sistema široko elnog otkopavanja mjerenjem u rudničkim prostorijama i analizom raspoložive projektno-tehničke dokumentacije.

ključne riječi: kinematika i dinamika otkopavanja, numerička analiza, CFD, široko elni otkop, antropogeni podzemni požar, spontana upala.

KINEMATIC ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE LONGWALL ADVANCE DYNAMICS TO THE COAL SPONTANEOUS COMBUSTION

Summary: Dimensions, shape and progress dynamics of longwall excavation are one of the most influential factors on the occurrence of anthropogenic underground fires in coal mines. By monitoring the technical and technological parameters, experimental measurements and computer simulation, impacts of kinematics and dynamics of various longwall excavation were analyzed. The paper analyzes mutual influences of three different longwall workings in specific excavation conditions and with high risk of spontaneous combustion. Active risk management system in Coal Mine "Underground mining" RMU Banovici is presented by using ventilation hazard detection model and risk assessment in accordance to international standards and practices in a very specific working conditions with two longwalls and different excavation technologies near the active mining areas. Coal Mine "Underground mining", earlier known as mine "Omazici", for many years is excavating coal using unique „radina“ longwall extraction method. Because of the large thickness of the coal seam excavation has been done in three layers, and metal mesh was installed between individual layers in order to control better roof caving during lower layers excavation. After decades of attempts to introduce mechanized excavation in an underground mine in Banovici new mechanized longwall support and shearer showed better results than the earlier attempts had. Work on mechanized longwall was carried out in parallel with the work of two classical old-fashioned longwalls, and in a way that longwalls mutual ventilation effect was evident.

From the war until 2013, coal mining at longwall was done by classical explosives based mining and manual loading on chain conveyor and support elements were mainly friction roof supports that required hard physical labor, and dictated small productivity. In year 2013 mechanized longwall was introduced, which works in parallel with two conventional longwalls. Because of the larger mechanized forehead progress dynamics and two longwalls workings operation in the immediate area, there is an increased fire risk

¹ Dr sc. Nenad Todorović, RMU Banovići

² Prof. dr Edin Deli, University of Tuzla, Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering, Univerzitetska 2, Tuzla, Bosnia and Herzegovina, edin.deli@untz.ba

³ Prof. Rijad Šišić, University of Tuzla, Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering, Univerzitetska 2, Tuzla, Bosnia and Herzegovina, rijad.sisic@untz.ba

⁴ Dipl.ing. Edisa Nukić, assistant, University of Tuzla, Faculty of Mining, Geology and Civil Engineering, Univerzitetska 2, Tuzla, Bosnia and Herzegovina, edin.deli@untz.ba

and possible interactions of the mentioned longwall working areas. The paper presents analysis of mutual kinematics and dynamics of longwalls progress, and their influence on fire hazard.

Registered cases of oxidative processes, their characteristics and experiences are presented in this paper. Aerodynamic parameters and fire characteristics of existing longwall excavation system are recorded by direct measuring in mine underground area and analysing available technical documentation.

Key words: cinematics and dynamics of mining excavation, numerical analysis, CFD, longwall working, anthropogenic underground fire, spontaneous combustion

1. UVOD

Požari u rudnicima sa podzemnom eksploatacijom uglja spadaju me u uzro nike najtežih nesre a koje se dešavaju. Decenijama se u doma oj rudarskoj praksi rudni ki požari tretiraju kao neželjeni doga aj sa primarno prirodnom genezom, te se u doma oj praksi u estalo koristi izraz „samoupala uglja“, kojim se implicira njihovo svrstavanje u nepredvidive. U anglosaksonskom govornom podru ju ovaj vid upale uglja naziva se „spontaneous combustion“, što bi u slobodnom prevodu zna ilo „spontana upala“. Razlika izme u ovih termina nije samo semanti ke prirode. Termin spontana ne implicira genezu upalnog procesa, ve njegovu spontanost, odnosno injenicu da nije uzrokovan željeno ili planirano. Rudni ki požari su po pravilu antropogenog porijekla, a iskustvo pokazuje da su potpuno predvidivi i da ih je mogu e sprije iti kada se provedu potrebne zaštitne mjere, koje iziskuju dobro poznavanje uslova nastanka požara i primjenu složenih mjera zaštite. Posebno složena je prevencija oksidacionih procesa u slu ajevima kada se mijenja tehnologija otkopavanja, kinematika napredovanja širokog ela ili dinamika otkopavanja, kada dolazi do zastoja u napredovanju rudarskih radova ili kada se zna ajnije mijenjaju ventilacioni uslovi.

U BiH je i dalje dominantan princip upravljanja ventilacijom, pa time i ventilacionim rizicima, sa reaktivno-normativnim pristupom, odnosno poduzimanjem mjera nakon incidentnih situacija ili uo enih potencijalnih opasnosti i zadovoljavanja zakonima i tehni kim propisima definisanih uslova. Osnovni nedostatak poduzimanja mjera nakon incidenata je u tome da se neželjeni doga aj ili stanje potencijalne opasnosti ve desi i može dovesti do stradanja i materijalnih šteta [7].

1.1. Zapaljivost uglja

Dosadašnja istraživanja potvr uju da je ugalj na podru ju Rudnika „Podzemna eksploatacija“ Banovi i sklon "samozapaljenju", a u tabeli 1. dat je prirodni indeks samozapaljenja [9] koji je odre en metodom Olpinskog. Dobivene vrijednosti prirodnog indeksa prera unate su na vrijednost bez pepela ($SZ_{pb}^{\circ}C/min$) i kre u se od 65,67 do 135,77 $^{\circ}C/min$, na osnovu ega je ugljeni sloj kategorisan u III grupu opasnosti po „prirodnom indeksu samozapaljenja“.

Tabela 1. Dosadašnji požari u Rudniku "Podzemna eksploatacija" [1]

Redni broj	Datum pojave požara	Mjesto pojave požara	Uzrok pojave požara
1.	1975	Vodosabirnik, K+166 m	Spontana upala zbog evidentiranih pukotina
2.	1978	TP "Zapad"	Spontana upala zbog evidentiranih pukotina
3.	1984	Široko elo 24, OPZ ₁	Sporo napredovanje i pojava manjeg rasjeda
4.	1985	Široko elo I N ₆	Sporo napredovanje i nekontrolisan gubitak zraka
5.	1988	Široko elo, OPNZ _{1/2}	Sporo napredovanje i blizina starog rada
6.	1988	TP OPN ₁	Sporo napredovanje ela
7.	1989	Široko elo 22, OPZ ₂	Sporo napredovanje zbog pove anih pritisaka na rasjedu
8.	1990	Široko elo 22, OPZ ₂	Sporo napredovanje zbog kvara na opremi
9.	1991	VP OPZ ₃₋₄	Rasjedna zona
10.	1992	VP OPZ ₃₋₄	Rasjedna zona
11.	1992	Široko elo 24, OPZ _{1/1}	Spontana upala zbog spore likvidacije
12.	1993	VP OPZ _{1/1}	Nekontrolisan gubitak zraka
13.	1998	TP OPZ ₃₋₄	Nekontrolisan gubitak zraka
14.	2000	OP NZ _{1/3}	Sporo napredovanje ela
15.	2006	OP Z _{1/2}	Sporo napredovanje ela
16.	2008	OP Z _{3-4/2}	Nekontrolisano prostrujavanje zraka

U okviru istraživanja za Elaborat o ispitivanju zapaljivih i eksplozivnih osobina ugljene prašine, kategorizaciji jame i klasifikaciji jamskih prostorija po stepenu opasnosti od opasne ugljene prašine 2007. godine [10] utvrđeni su slijedeći parametri zapaljivosti i eksplozivnosti ugljene prašine sa temperaturom samozapaljenja za sloj ugljene prašine debljine 5 mm uz vrijednosti od $260 \pm 3,6^{\circ}\text{C}$ u vremenu od 90 min. Prema Elaboratu [5], a u odnosu na spontanu upalu prašina je kategorisana kao bezopasna. Konstatcija o prašini kao „bezopasnoj“ ni u kom slučaju ne može se primijeniti po principu analogije na sklonost uglja ka spontanoj oksidaciji i samoupali.

2. KINEMATSKA ANALIZA NAPREDOVANJA ŠIROKIH ELA

Kinematska analiza napredovanja širokog dela je analiza geometrijskog oblika po etne strukture pripremnih i otkopnih prostorija sa trajektorijom putanje, odnosno kretanje i pozicije koje prolazi široko delo od momenta po etka otkopavanja do likvidacije.

The diagram illustrates a production layout with four main work areas, each represented by a gray rectangle. The layout is organized into two rows. The top row contains two areas: 'TP OP Z₅' (top right) and 'VP OP Z₅' (top left). The bottom row contains two areas: 'TP OP Z_{3-4/2}' (bottom right) and 'VP OP Z_{3-4/2}' (bottom left). Material flow is indicated by colored arrows: red arrows show the main flow direction (generally from right to left), green arrows show specific flow paths within the areas, and blue arrows show flow between the areas. The left side of the layout is labeled 'šč mehanizovano' (mechanized work) and the right side is labeled 'šč br.2' (work number 2). The bottom right area is also labeled 'šč br.3' (work number 3).

Ugljeni sloj je podijeljen na pojaseve, odnosno zahvate od krovine prema podini, tako da se kod klasi nih širokih el a sa buša ko minerskim radovima, ugljeni sloj dijeli na 6 pojaseva po 2,5 m [2]. U zavisnosti od mogu nosti ovi pojasevi se otkopavaju u dva ili tri zahvata. Kod mehanizovanog Š sloj je izdijeljen na pojaseve po 3,2 m, obzirom na dimenzije i oblik podgrade i otkopne mašine, tako da se mogu formirati 4 ovakva pojasa. Sa po etkom ventilacije po etnog uskopa na Š otkopu, odnosno od momenta uspostave proto ne ventilacije, prostor oko rudni kih prostorija izložen je razlikama pritiska usljed djelovanja glavnog ventilatora, a evidentne su zna ajne razlike potencijala izme u pojedinih ta aka u prostoru. Kao posebno specifi ne i sa aspekta požarne opasnosti zna ajne mogu se identificirati zone:

- 29

ra una o isto i otkopavanja, ne može se isključiti mogućnost prisustva komada uglja ili drugih materijala sklonih spontanjoj oksidaciji, koji mogu biti nosioci oksidacionog procesa.

3. Zona aeracije u ugljenom sloju u rubnom dijelu kod križišta
Usljed djelovanja ventilatora, te lokalnih konvzionih optora i skretanja vazdušne struje, dio vazduha nastoji proći „prečicom“ kroz ugljeni sloj, te je redovna pojava da kroz pukotine prolazi dio vazdušne struje.
4. Zona pukotinske aeracije u ugljenom sloju ispred otkopne fronte Š
Ovisno o dužini Š, stepenu ispuhalosti ugljenog sloja i efektivnom pritisku (razlici potencijala) ventilatora, moguće je da manji ili veći dio vazduha uopšte ne dođe na Š otkop, već da prostruji kroz sam ugljeni sloj ili krovinske ili podinske naslage u neposrednoj okolini ugljenog sloja.
5. Zona aeracije izmeću dvije susjedne ventilacione prostorije
Ovu zonu čini prostor izmeću ventilacione prostorije OP Z3-4/2 i ventilacione prostorije OP Z5 uključujući i zaštitni stub izmeću ovih prostorija koji ovisno o stepenu ispuhalosti te razlici potencijala izmeću ove dvije susjedne prostorije podliježe uticaju efektivnog pritiska ventilatora te dolazi do „prostrujavanja“ vazduha kroz zaštitni stub.

Dužine zona aeracije mogu se označiti kako slijedi:

l_{kr-str} – maksimalna dužina zone aeracije u neposrednoj okolini križišta, m

l_{str} – maksimalna dužina zone aeracije u starom radu iza Š otkopa, m

l_{kr-sl} – maksimalna dužina zone aeracije u ugljenom sloju u rubnom dijelu kod križišta, m

l_{sl} – maksimalna udaljenost zone pukotinske aeracije od Š fronte u pravcu napredovanja Š, m

Vrijeme ekspozicije (izloženosti) pojedinih od zona ovisi direktno o brzini napredovanja Š fronte, jer se sama zona pomjera sa kretanjem Š od početnog uskopa ka granici likvidacije.

Dužina ekspozicije koja predstavlja zbir maksimalne dužine zone aeracije u starom radu i maksimalne udaljenosti zone pukotinske aeracije od široke elne fronte u pravcu napredovanja širokog elna, odnosno:

$$L_{eksp} = l_{str} + l_{sl} \text{ (m)} \quad (1)$$

Kritična brzina napredovanja:

$$v_{kr} = \frac{L_{eksp}}{t_{eksp(kr)}} \text{ (m/dan)} \quad (2)$$

gdje je:

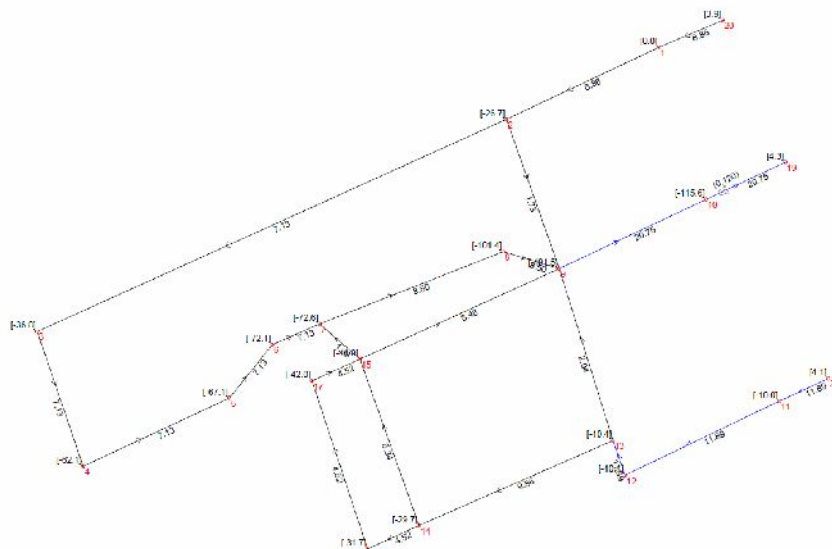
$t_{eksp(kr)}$ – kritično vrijeme eksplozicije ugljene mase u sloju.

Imajući u vidu međusobni uticaj širokih elnih fronti, nužno je pri analizi vremena eksplozicije uzeti i uticaje susjednih elna u obzir.

2.2. Proračun i simulacija uticaja varijacije ventilacionih parametara

Početak eksploatacije mehanizovanog Š u Rudniku „Podzemna eksploatacija“, RMU „Banovići“, karakteriše se lociranjem otkopne fronte neposredno uz frontu postojeća dva klasična široka elna (Š br.2 i Š br.3) [1]. Uvođenje nove tehnologije istovremeno je pratile izrazitim međusobnim uticajem ventilacionih parametara sva 3 aktivna široka elna.

Na slikama 1., 2. i 3. prikazane su šeme korištene za numeričku simulaciju raspodjele vazduha u ventilacionim odjeljenjima svakog od 3 aktivna široka elna u različitim fazama.

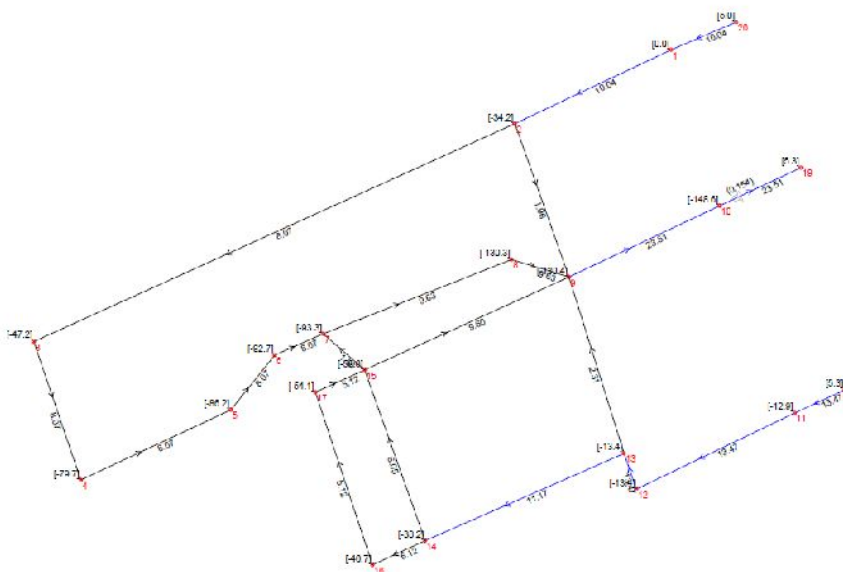


Slika 2. Raspodjela vazduha u ventilacionim odjeljenjima širokih elu u zate enom stanju

Distribucija protoka vazduha i aerodinami kih potencijala „u zate enom stanju“ bazira se na višekratnim mjerenjima otpora i redovnoj kontroli ventilacionih parametara koja se operativno provodi u Rudniku.

Na svakom od pripadaju ih ogranaka numeriki je dat zapreminski protok vazduha u m^3/s , a na vrnim ta kama, u uglastim zgradama, data je vrijednost relativnog pritiska, odnosno potencijala u odnosu na atmosferski pritisak u Pa.

Ukupan zapreminski protok vazduha za ventilaciju sve 3 aktivna široka elu iznosi $20,75 \text{ m}^3/\text{s}$. Za ventilaciju mehanizovanog širokog elu ide $7,13 \text{ m}^3/\text{s}$. Dva klasi na široka elu ventiliraju se sa po $5,34$ i $4,52 \text{ m}^3/\text{s}$, dok mjerenjima utvr eno prostrujavanje, odnosno gubici izme u ventilacionih prostorija OPZ3-4/2 i OPZ5 iznosi $1,38 \text{ m}^3/\text{s}$.

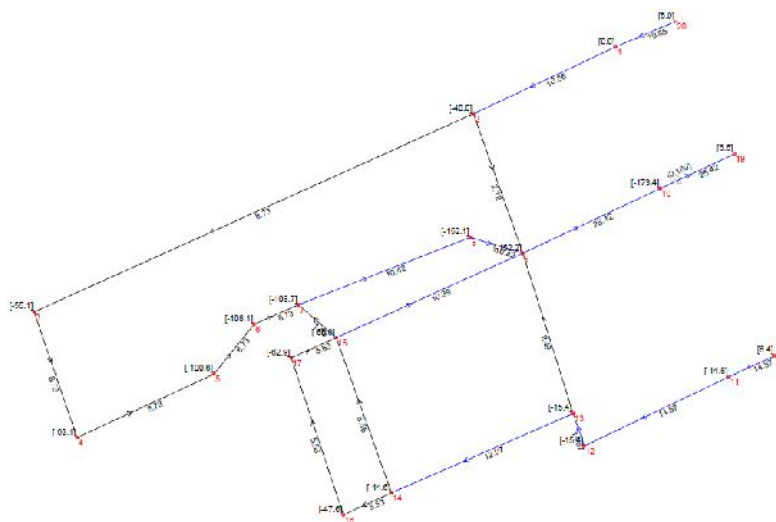


Slika 3. Raspodjela vazduha u ventilacionim odjeljenjima širokih elu u slu aju pove anja efektivnog pritiska u reviru za 25 %

Sa ciljem analize svrsishodnosti pove anja protoka pove anjem efektivnog potencijala glavnog ventilatora izvršena je simulaciona analiza ventilacije za pove anje efektivnog pritiska u iznosu od 25% i 50% u odnosu na zate eno stanje.

Pove anjem efektivnog pritiska (depresije) za $\frac{1}{4}$ odnosno 25% postiže se prosje no pove anje zapreminskog protoka u prostorijama za 13,25%, odnosno polovina procentualnog prirasta efektivnog pritiska ventilatora.

Pove anjem efektivnog pritiska (depresije) u otkopnim poljima za $\frac{1}{2}$ odnosno 50% postiže se prosje no pove anje zapreminskog protoka u prostorijama za 22,46%, što je tako e polovina „o ekivanog“ efekta ukoliko bi odnos izme u ove dvije veli ine bio linearan.



Slika 4. Raspodjela vazduha u ventilacionim odjeljenjima širokih elu u slu aju pove anja efektivnog pritiska u reviru za 50 % u odnosu na zate eno stanje

U narednoj tabeli prikazana je raspodjela vazduha u prostorijama otkopnih polja Z3-4/2 i Z5 u zate enom stanju, te nakon pove anja efektivnog pritiska za 1/4 i za 1/2 , odnosno za 25 % i za 50 %, iz koje se vidi prirast. Ovo pove anje depresije, kako je ve navedeno, iznosi 13,25 % , odnosno 22,46 % . Iz tabele se uo ava da se efektivni pritisak u oba slu aja pove ava za polovinu „o ekivanog“ efekta prirasta.

Tabela 2. Raspodjela vazduha u tri analizirane faze

Ogranak	Prostorija	Zapreminski protoci vazduha u prostorijama				
		Zate eno	25%		50%	
		m ³ /s	m ³ /s	Prirast,%	m ³ /s	Prirast,%
20-1	TP OP Z5	8,86	10,04	13,32%	10,85	22,46%
1-2	TP OP Z5	8,86	10,04	13,32%	10,85	22,46%
2-3	TP OP Z5	7,13	8,07	13,18%	8,73	22,44%
3-4	Š P OP Z5	7,13	8,07	13,18%	8,73	22,44%
4-5	VP OP Z5	7,13	8,07	13,18%	8,73	22,44%
5-6	VP OP Z5	7,13	8,07	13,18%	8,73	22,44%
6-7	VP OP Z5	7,13	8,07	13,18%	8,73	22,44%
7-8	VP OP Z5	8,5	9,63	13,29%	10,42	22,59%
7-15	prostrujavanje	1,38	1,56	13,04%	1,69	22,46%
8-9	VP OP Z5	8,5	9,63	13,29%	10,42	22,59%
9-10	VP OP Z3-4/2	20,75	23,51	13,30%	25,42	22,51%
10-19	VP OP Z3-4/2	20,75	23,51	13,30%	25,42	22,51%
9-15	VP OP Z3-4/2	8,48	9,6	13,21%	10,39	22,52%
15-17	VP OP Z3-4/2	4,52	5,12	13,27%	5,53	22,35%
17-16	Š br.3 OP Z3-4/2	4,52	5,12	13,27%	5,53	22,35%
16-14	TP OP Z3-4/2	4,52	5,12	13,27%	5,53	22,35%
14-15	Š br.2 OP Z3-4/2	5,34	6,05	13,30%	6,55	22,66%
14-13	TP OP Z3-4/2	9,86	11,17	13,29%	12,07	22,41%
13-12	Prekop br.1 OP Z3-4/2	11,89	13,47	13,29%	14,57	22,54%
12-11	TP OP Z2	11,89	13,47	13,29%	14,57	22,54%
11-21	TP OP Z2	11,89	13,47	13,29%	14,57	22,54%
13-9	Prekop br.1 OP Z3-4/2	2,04	2,31	13,24%	2,49	22,06%
9-2	Prekop br.1 OP Z5	1,73	1,96	13,29%	2,12	22,54%

U narednoj tabeli dat je prikaz stanja potencijala izme u pojedinim vorišta u posmatranom rudni kom reviru, odnosno otkopnim poljima Z3-4/2 i Z5. Ovi podaci obrađivani su na sli an na in kao prethodni, odnosno posmatrani su potencijalu u zate enom stanju, te nakon pove anja efektivnog pritiska za ¼, odnosno za ½, ili za 25 % i za 50 %.

Opaža se da je stanje na mjestu koje nazivamo „prostrujavanje“, tako er doživjelo promjene koje se dešavaju i u ostalim dijelovima ovih prostorija što je veoma bitno za dalju analizu stanja potencijala, odnosno analizu požarne opasnosti u posmatranom dijelu rudni kih prostorija.

Tabela 3. Stanje potencijala u tri analizirane faze

Ogranak	Naziv prostorije	Potencijal (Pa)		
		Zate eno stanje	Kod pove anja depresije revira za 25 %	Kod pove anja depresije revira za 50 %
20-1	TP OP Z5	[3,9]÷[0,0]	[5,0]÷[0,0]	[5,9]÷[0,0]
1-2	TP OP Z5	[0,0]÷[-26,7]	[0,0]÷[-34,2]	[0,0]÷[-40,0]
2-3	TP OP Z5	[-26,7]÷[-36,8]	[-34,2]÷[-47,2]	[-40,0]÷[-55,1]
3-4	Š P OP Z5	[-36,8]÷[-62,1]	[-47,2]÷[-79,7]	[-55,1]÷[-93,1]
4-5	VP OP Z5	[-62,1]÷[-67,1]	[-79,7]÷[-86,2]	[-93,1]÷[-100,6]
5-6	VP OP Z5	[-67,1]÷[-72,1]	[-86,2]÷[-92,7]	[-100,6]÷[-108,1]
6-7	VP OP Z5	[-72,1]÷[-72,6]	[-92,7]÷[-93,3]	[-108,1]÷[-108,7]
7-8	VP OP Z5	[-72,6]÷[-101,4]	[-93,3]÷[-130,3]	[-108,7]÷[-152,1]
7-15	prostrujavanje izme u VP OP Z5 i VP OP Z3-4/2	[-72,6]÷[-44,0]	[-93,3]÷[-56,6]	[-108,7]÷[-65,9]
8-9	VP OP Z5	[-101,4]÷[-101,5]	[-130,3]÷[-130,4]	[-152,1]÷[-152,2]
9-10	VP OP Z3-4/2	[-101,5]÷[-115,6]	[-130,4]÷[-148,6]	[-152,2]÷[-173,4]
10-19	VP OP Z3-4/2	[-115,6]÷[4,3]	[-148,6]÷[5,3]	[-173,4]÷[6,6]
9-15	VP OP Z3-4/2	[-101,5]÷[-44,0]	[-130,4]÷[-56,6]	[-152,2]÷[-65,9]
15-17	VP OP Z3-4/2	[-44,0]÷[-42,0]	[-56,6]÷[-54,1]	[-65,9]÷[-62,9]
17-16	Š br.3 OP Z3-4/2	[-42,0]÷[-31,7]	[-54,1]÷[-40,7]	[-62,9]÷[-47,6]
16-14	TP OP Z3-4/2	[-31,7]÷[-29,7]	[-40,7]÷[-38,2]	[-47,6]÷[-44,6]
14-15	Š br.2 OP Z3-4/2	[-29,7]÷[-44,0]	[-38,2]÷[-56,6]	[-44,6]÷[-65,9]
14-13	TP OP Z3-4/2	[-29,7]÷[-10,4]	[-38,2]÷[-13,4]	[-44,6]÷[-15,4]
13-12	Prekop br.1 OP Z3-4/2	[-10,4]÷[-10,4]	[-13,4]÷[-13,4]	[-15,4]÷[-15,4]
12-11	TP OP Z2	[-10,4]÷[-10,0]	[-13,4]÷[-12,9]	[-15,4]÷[-14,8]
11-21	TP OP Z2	[-10,0]÷[4,1]	[-12,9]÷[5,9]	[-14,28]÷[6,4]
13-9	Prekop br.1 OP Z3-4/2	[-10,4]÷[-101,5]	[-13,4]÷[-130,4]	[-15,4]÷[-152,2]
9-2	Prekop br.1 OP Z5	[-101,5]÷[-26,7]	[-130,4]÷[-34,2]	[-152,2]÷[-40,0]

U narednoj tabeli 4. dat je uporedni prikaz porasta efektivnih pritisaka u važnijim vorištima i potencijala izme u ventilacionih i transportnih hodnika širokih elu i ventilacionih hodnika dva široko elna otkopa. Može se uo iti da pove anje efektivnog pritiska, odnosno djelovanja glavnog ventilatora, ima za posljedicu proporcionalno pove anje potencijala na vorištima u ventilacionom sistemu, odnosno potencijala u svim ta kama promatranog domena.

Na temelju numerike analize može se zaklju iti da je za pove anje zapreminskog protoka u otkopnim poljima nepohodno u dvostrukom procentu pove ati i efektivne pritiske, odnosno da pove anje efektivnog pritiska ventilatora u otkopnom polju dovodi do dvostruko manjeg efekta u pove anju zapreminskih protoka [6].

Problem se dodatno usložnjava ukoliko se promatra ventilacioni sistem u cjelini. Pove anje efektivnog pritiska ventilatora u odre enom procentu ne e u tom istom procentu zna iti i pove anje potencijala u otkopnim poljima, a što je rezultat fizi kih osobina vazduha (fluidnost i stišljivost), te eksponencijalnog pove anja angažirane snage i gubitaka u odnosu na efektivni potencijal ventilatora.

Tabela 4. Uporedni prikaz porasta efektivnih pritisaka

Područje	VORIŠTE	Velicina	Efektivni pritisak, Pa		
			Zateeno	25%	50%
Prekop 1 OP Z5	2	h, Pa	-26,70	-34,20	-40,00
	9	h, Pa	-101,50	-130,40	-152,20
	2 do 9	dp, Pa	74,80	96,20	112,20
Veza gubitak	7	h, Pa	-72,60	-93,30	-108,70
	15	h, Pa	-44,00	-56,60	-65,90
	7 do 15	dp, Pa	28,60	36,70	42,80
Klas Š	15	h, Pa	-44,00	-56,60	-65,90
	14	h, Pa	-29,70	-38,20	-44,60
	15 do 14	dp, Pa	14,30	18,40	21,30
Meh Š	3	h, Pa	-36,80	-47,20	-55,10
	4	h, Pa	-62,10	-79,70	-93,10
	3 do 4	dp, Pa	25,30	32,50	38,00
Prekop 1 OPZ 34/2	9	h, Pa	-101,50	-130,40	-152,20
	13	h, Pa	10,40	-13,40	-15,40
	9 do 13	dp, Pa	111,90	117,00	136,80

Pri radu široko elnih otkopnih polja u neposrednoj blizini sa me usobnim uticajem ventilacionih prostorija, kako je to u predmetnom sluaju, svako pove anje efektivnih pritisaka (depresije) ventilatora višestruko uve ava i gubitke prostrujavanjem vazduha izvan ventilacionih puteva, a time i pove anje ekspozicije izdrobljene ugljene mase prema jamskom vazduhu, a što je direktno proporcionalno sa požarnom opasnoš u.

Vidimo da se u eksperimentalno utvr enom „ogranku gubitka“ izme u dva široko elna polja razlika potencijala (depresije) pove ava sa utvr enih 28,6 Pa na maksimalnih 42,8 Pa. U sluaju postojanja oksidacionih žarišta, mogu eg prisustva tinjanja uglja ili drugog vida sklonosti ka spontanoj upali, ovakvo pove anje razlike potencijala može dovesti do neželjenog razvoja oksidacionih procesa i pojave plamena.

2.3. Brzina otkopavanja

Dinamika otkopavanja širokog elja ovisi o vremenskoj funkciji razvoja i kretanja široko elnog otkopavanja, odnosno pozicije širokog elja tokom vremena od po etka do kraja otkopavanja.

Tabela 5. Prikaz dinamike napredovanja otkopne fronte klasi nih širokih elja (Napomena: navedeno je ostvareno napredovanje do 1.4.2013. godine, i 1.1.2014. o ekivano napredovanje do likvidacije akutelnog klasi nog Š otkopnog polja)

OSTVARENO NAPREDOVANJE KLASI NOG Š				
Datum	Pozicija Š	Napred	Vrijeme	Brzina
	m	m	dana	m/mjesec
3.3.2007.	0			
1.6.2008.	150	150	456	9,87
15.11.2009.	300	150	532	8,46
10.2.2011.	450	150	452	9,96
1.12.2011.	600	150	294	15,31
1.4.2013.	750	150	487	9,24
1.1.2014.	840	90	275	9,82
UKUPNO		840	2496	10,10

U periodu od 2007. do 2013. godine pronađena je dinamika otkopavanja sve tri klase otkopa u Rudniku „Podzemna eksploatacija“. U tabeli 5. dat je prikaz ostvarene i otkrivane dinamike napredovanja dvije klase otkopne fronte. U aktivnom otkopnom polju ova dva klase rade gotovo 7 godina, sa ostvarenim napredovanjem fronte od oko 750 m, i otkrivanjem napredovanjem do granice otkopavanja oko 90 m. U proteklom periodu ova klase su napredovale srednjom prosječnom brzinom od 10,57 m/mjesec, a do kraja otkopavanja otkriva se napredovanje od oko 9,82 m/mjesec.

U tabeli 6. prikazano je ostvareno i planirano napredovanje otkopne fronte mehanizovanog širokog klase od momenta puštanja u rad do 1.10.2013. godine, kao i planirano napredovanje do okončanja eksploatacije u prvom zahvatu ovog polja. Treba imati u vidu da se prvi mjeseci eksploatacije mogu tretirati kao vrijeme uvođenja nove tehnologije, te ostvareno napredovanje od 75 m/mjesec tretirati u tom kontekstu. Previđena dužina otkopavanja mehanizovanog klase je 732 m, a otkriva se dostizanje granice otkopavanja za 273 dana, odnosno za period kraći od godinu dana. Prosječna brzina napredovanja do 1.10.2013. godine iznosi 75 m/mjesec, a maksimalno teoretsko napredovanje može iznositi do 144 m/mjesec⁵. Prema planu napredovanja do 1.5.2014. godine otkrivena brzina napredovanja mehanizovane klase otkopne fronte iznosi 82 m/mjesec.

Tabela 6. Prikaz dinamike napredovanja otkopne fronte mehanizovanog širokog klase (Napomena: navđeno je ostvareno napredovanje do 1.10.2013. godine, i otkriveno napredovanje do likvidacije akutelnog mehanizovanog klase otkopnog polja)

OSTVARENO NAPREDOVANJE KLASE OTKOPNE				
Datum	Pozicija klase	Napred	Vrijeme	Brzina
	m	m	dana	m/mjesec
1.8.2013.	0			
1.10.2013.	152,5	152,5	61	75,00
1.12.2013.	330	177,5	61	87,30
1.2.2014.	495	165	62	79,84
1.4.2014.	660	165	59	83,90
1.5.2014.	732	72	30	72,00
UKUPNO		732	273	80,44

Dinamiku otkopavanja diktira brzina izvođenja rudarskih radova, odnosno brzina napredovanja pojedine od otkopnih fronti. Brzina napredovanja i međusobni odnosi pojedinih otkopnih fronti direktno utiču na požarnu opasnost, jer je osnovni uticajni parametar vrijeme ekspozicije ugljene mase prema oksidansu direktno vezan za kretanje otkopnih fronti.

Ukoliko pretpostavimo da je u nekoj proizvoljnoj tački uspostavljen kontakt ugljene mase sa jamskim vazduhom onog trenutka kada je pošlo napredovanje klase fronte, vrijeme ekspozicije te tačke vazdušnoj masi i kiseoniku kao oksidansu može se izraziti:

$$t_{exp} = \frac{l}{v_{se}} \quad (3)$$

gdje je:

t_{exp} – vrijeme ekspozicije (izloženosti) posmatrane tačke vazdušnoj struji usljed aeracije, mjeseci

v_{se} – brzina napredovanja široke elne fronte, m/mjesec

l – dužina posmatrane zone aeracije, m

Pojedini dijelovi prostora izloženog aeraciji mogu imati znatno veće vrijeme ekspozicije ukoliko dođe do prostrujavanja vazduha prije početka rada klase ili ako zahvaćene zone ostanu ventilirane i nakon likvidacije klase. Kao primjer može se uzeti eventualno prostrujavanje vazduha kroz ugljeni sloj na samom početku otkopnog polja, odnosno u dijelu zaštitnog stuba koji ostaje neotkopan. Odmah nakon uspostavljanja protoka ventilacije u prvoj petlji dolazi do pojave razlike potencijala na granicama ove zone. Ukoliko postoje vezane pukotine kroz koje može strujati vazduh, doći će do prostrujavanja koje će praktično trajati i nakon likvidacije klase.

Dakle povećano vrijeme aeracije pojedinih zona može se uočiti u sljedećim:

- Ako postoje uslovi da se kroz neku od zona uspostavi aeracija prije početka rada klase otkopa, kao što je npr. prostrujavanje kroz ugljeni sloj.
- Ako usljed nađina izvođenja radova na klase ili međusobne interakcije nekih od zona sa drugim rudničkim prostorijama dođe do prostrujavanja koje nije direktno uzrokovano samo za promatrano klase.

⁵ Na osnovu maksimalnog dnevnog kapaciteta od 2000 t rovnog uglja dnevno, deklariranog u tehničkim specifikacijama opreme i pri optimalnim radnim uslovima

- Ako nakon likvidacije Š ostane mogu nost aeracije neke od zona, kao što su npr. zona ugljenog sloja ostavljena u zaštitnom stubu ili dio starog rada i sli no.

U ovim slu ajevima nužno je pove ati vrijeme ekspozicije promatrane ta ke, pa bi prethodna jedna ina imala oblik:

$$t_{exp} = t_{exp}' + \frac{l}{v_{\Sigma}} + t_{exp}'' + t_{exp}^{(z)} \quad (4)$$

gdje je:

t_{exp}' – vrijeme ekspozicije promatrane zone prije po etka napredovanja, mjeseci

t_{exp}'' – vrijeme ekspozicije promatrane zone nakon likvidacije Š , mjeseci

$t_{exp}^{(z)}$ – vrijeme ekspozicije promatrane zone tokom zastoja u napredovanju Š fronte, mjeseci

Kada se govori o zastojima, misli se na zastoje široko elne otkopne fronte koje iz bilo kojih razloga traju nekoliko dana ili više, što ima direktan uticaj na vrijeme ekspozicije. Redovni zastoji koji se ti u održavanja i drugih sli nih razloga ne mogu se uzeti u obzir kada je u pitanju vrijeme ekspozicije jer imaju vrlo mali ili gotovo nikakav uticaj.

Veli ina svake od definiranih zona aeracije ovisi o nizu faktora, me u kojima su najzna ajniji:

1. **Ispucalost ugljenog sloja i okolnih stijena** – Efektivnu poroznost ugljenog sloja determiniše zapremina svih me usobno povezanih pora koje mogu omogu iti strujanje vazduha kroz ugljeni sloj ili okolne stijene. Ve a efektivna poroznost zna i i ve u opasnost od prostrujavanja vazduha. Tako e ve e koli ine vazduha ili ve i efektivni pritisak uzrokovat e pove anje koli ina vazduha koje prostrujavaju kroz ugljeni sloj i okolne stijene.
2. **Stanje starog rada: konsolidiranost, prisustvo uglja u starom radu, veli ina praznih prostora pogodnih za strujanje vazduha i sli no** – U prostoru iza Š ostaje ve i ili manji prazan prostor koji ispunjava jamski vazduh, a usljed djelovanja potencijala ventilatora, prisutno je i strujanje vazduha. Veli ina ovako „neželjeno ventiliranog prostora“ obi no nije mala i iznosi više desetina metara. U slu aju zastoja u napredovanju Š fronte i prisustva ostataka uglja ili drveta u starom radu, ova zona je veoma pogodna za razvoj spontane oksidacije i pojavu požara. Požari u starom radu spadaju me u naj eš e oblike spontane upale uglja pri Š otkopavanju.
3. **Koli ina vazduha kojom se ventilira Š otkop** – Potreba za ve im koli inama vazduha u Š otkopu uslovljena je sa više faktora. Ve i popre ni presjeci Š otkopa zna e i potrebne ve e koli ine vazduha radi zadovoljenja minimalno propisane brzine strujanja vazduha. Osim ve ih profila, pove anje brzine napredovanja i proizvodnje uglja tako e diktiraju potrebu za više vazduha. Ukoliko se pove ava koli ina vazduha bez pove anja ekvivalentnog otvora jame, odnosno bez pove anja popre nog presjeka prostorija, ve e koli ine vazduha zna e i potrebu za ve im efektivnim pritiscima, što pove ava zone aeracije oko Š fronte.
4. **Efektivni pritisak (esto nazvan „depresija“ ili „razlika potencijala“) ventilatora u Š otkopnom polju**– Jame u BiH karakterišu se generalno kao „tjesne jame“ zbog izbora projektanata i invenstitora da se rudnik otvara, razra uje i priprema prostorijama što manjeg profila. Pretpostavka da se manjim profilima ostvaruje brže napredovanje, da su manja ulaganja u objekte i da je nužno samo osigurati mogu nost prolaska ljudi i postavljanja opreme, naši rudnici imaju ekvivalentne otvore uglavnom u rasponu od 1-1,5 m². Standardi u razvijenim zemljama su uglavnom u okviru 4-6 m² za ekvivalentne otvore jame, dok su u SAD veoma esto ekvivalentni otvori i iznad 8 m². Višestruko manji ekvivalentni otvor zna i isto toliko više „tjesnu“ jamu za protok vazduha, zbog ega je nužno primijeniti ventilatore ve eg efektivnog pritiska („depresije“). Ve i efektivni pritisak direktno dovodi do pove anja zone aeracije i do pove anja koli ina vazduha koje prostrujavaju „neželjenim i štetnim“ putanjama kroz pukotine i kroz stari rad. U slu aju nužnog pove anja efektivnog pritiska dodatni problem predstavlja i injenica da se unutar samog širokog ela protok ne pove ava proporcionalno pove anju potencijala glavnog ventilatora. Nerijetko se dvostrukim pove anjem potencijala ventilatora dobije tek neznatno ve i protok na širokim elima, ako se radi o dubokim i razvijenim jamama.

3. NUMERI KO MODELIRANJE CFD

Vrijeme i intenzitet ekspozicije potencijalno zapaljive ugljene mase jamskim vazduhom ne ovisi isklju ivo o kinematici širokog ela i dinamici napredovanja. Zbog poroznosti starog rada, ugljenog sloja, okolnih stijena i zaštitnih stubova, stalno je prisutno „prostrujavanje“ vazduha putanjama koje nisu poželjne.

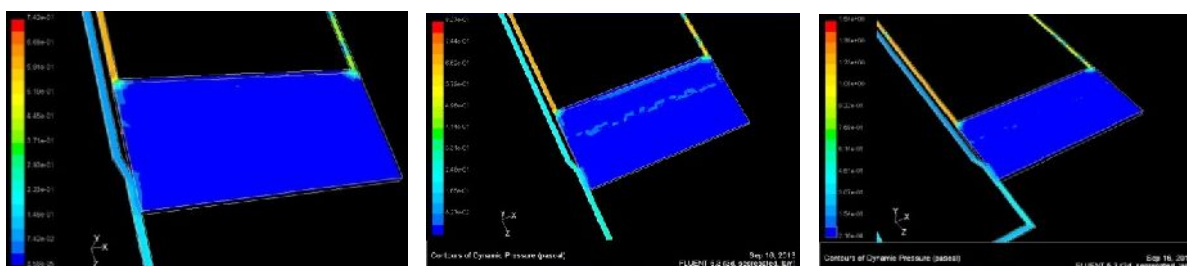
Zone koje smo nazvali „zone aeracije“ prakti no se nalaze unutar ukupnog prostora koji je pod uticajem „depresije“, odnosno negativnog potencijala, glavnih ventilatora. Što je ve intenzitet rada glavnih ventilatora, to je ve a i zona aeracije, a time i intenzitet oksidacije na potencijalnim žarištima. Znaju i iz iskustva za ovu osobinu uobi ajena u rudarskoj terminologiji je tvrdnja da se „ve om depresijom može zapaliti jama“, a što je rezultat negativnih iskustava sa ve inom pokušaja da se ve im potencijalom glavnih ventilatora dobije više vazduha na širokim elima.

Uzmu li se u obzir danas raspoložive naučne metode za analizu ovih pojava, kao posebno pogodna može se smatrati numerička analiza diskretizacijom posmatranog prostora primjenom „metode konačnih zapremina“, odnosno implementacijom Navier-Stokes-ovog numeričkog modela za izračunavanje osobina fluida u prostoru [4], [5].

Za razliku od klasičnih metoda obračuna u ventilaciji rudnika u kojima se praktično zanemaruju razlike u strujanju vazduha unutar posmatranog profila, metoda konačnih zapremina analizira svaku elementarnu zapreminu ponaosob i u stanju je dati željene podatke za svaku tačku.

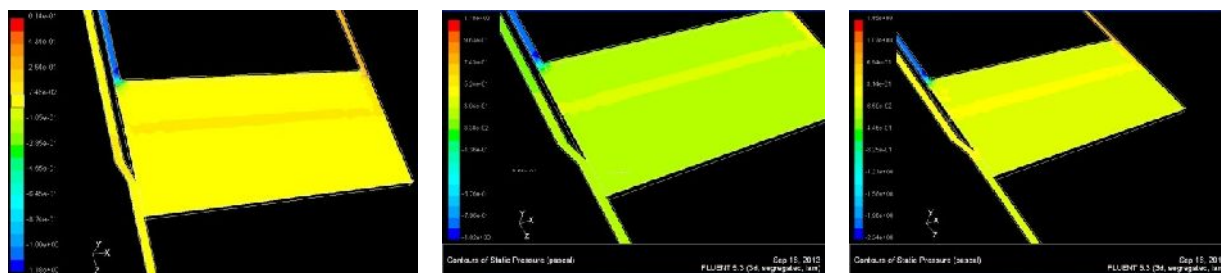
Za potrebe predmetnog istraživanja razvijen je 3D model tri aktivna široka elna prema situaciji za period 2013.-2014. godina, odnosno u skladu sa zatečenom situacijom i planiranim razvojem rudarskih radova.

Kao posebno specifičan momenat uoen je otkrivani susret tri široko elne fronte u momentu kad mehanizovano elo sustigne trenutno aktivna dva klasična široka elna. Ove otkopne fronte međusobno se oslanjaju i može se smatrati da izrazito utiču u jedna na drugu u ventilacionom smislu. Zbog rasjedne zone na pravcu kretanja otkopnih fronti, te otkivanih teškoća i moguće pojave oksidacije pri približavanju široko elnih fronti iz dva susjedna otkopna polja izvršeno je djelimično odvajanje, odnosno međusobno odmicanje ventilacionih prostorija dva široko elna otkopa. Na slici 5. prikazan je numerički CFD model Šć otkopavanja u Rudniku „Podzemna eksploatacija“ sa prikazom oblika i dimenzije zona aeracije oko Šć i intenzitetom dinamičkog pritiska.



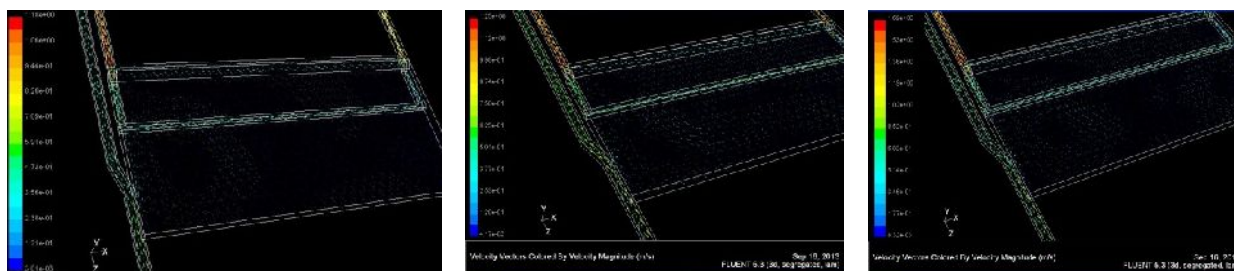
Slika 5. Dinamički pritisak; nulto stanje; + 25 %; + 50 %

Na slici 6. prikazan je numerički CFD model Šć otkopavanja u Rudniku „Podzemna eksploatacija“ sa prikazom oblika i dimenzije zona aeracije oko Šć i intenzitetom statičkog pritiska.



Slika 6. Statički pritisak; nulto stanje; + 25 %; + 50 %

Na slici 7. prikazan je numerički CFD model Šć otkopavanja u Rudniku „Podzemna eksploatacija“ sa prikazom oblika i dimenzije zona aeracije oko Šć i intenzitetom vektora brzine.



Slika 7. Vektori brzine; nulto stanje; +25%; +50%

Na osnovu gornjih dijagrama prikazanih na slikama 5.-7. koji su rezultat 3-dimenzionalne analize ventilacionih parametara primjenom diskretne analize i CFD (Computational Fluid Dynamics) simulacije sa prikazanim intenzitetima apsolutnog (statičkog) pritiska u prostoru, dinamičkog pritiska i vektora brzine, na bazi promjena statičkog ili dinamičkog pritiska ili vektora brzina, a na osnovu kojih su uspostavljene „zone uticaja“, te u okviru ovih zona grupisano osam (za statički pritisak) dijelova prostorija ili zapremina prostora za koje se vrši analiza, odnosno sedam grupa kada se radi o dinamičkom pritisku i vektorima brzina (VP OP Z5, Zona Šć br.2 i Šć br.3 i zona oko 50 m iza Šć br.3, Šć br. 3, Križište Šć br.2 i VP OP Z3-4/2, VP OP Z3-4/2, Dio VP OP Z3-4/2 na oko 10 m od križišta sa Šć br.2, TP OP Z3-4/2, Križište Šć br.2 i TP OP Z3-4/2)

Tabela 7. Prikaz rezultata CFD simulacione analize promjena statičkog pritiska na modelu

	Statički pritisak (Pa)							
Zone statičkog pritiska	VP OP Z ₅	Zona Š br.2 i Š br.3 i zona oko 50 m iza Š br.3	Š br. 3	Križište Š br.2 i VP OP Z _{3-4/2}	VP OP Z _{3-4/2}	Dio VP OP Z _{3-4/2} na oko 10 m od križišta sa Š br.2	TP OP Z _{3-4/2}	Križište Š br.2 i TP OP Z _{3-4/2}
Po etno stanje	$[7,46 \cdot 10^{-1}] \div [-1,05 \cdot 10^{-1}]$	$[7,46 \cdot 10^{-1}] \div [-1,05 \cdot 10^{-1}]$	$[7,46 \cdot 10^{-1}] \div [-1,05 \cdot 10^{-1}]$	$[-2,85 \cdot 10^{-1}] \div [-4,65 \cdot 10^{-1}]$	$[-1,00]$	$[-1,18]$	$[2,54 \cdot 10^{-1}]$	$[2,54 \cdot 10^{-1}]$
+ 25 %	$[8,38 \cdot 10^{-2}] \div [3,04 \cdot 10^{-1}]$	$[8,38 \cdot 10^{-2}]$	$[3,04 \cdot 10^{-1}]$	$[8,38 \cdot 10^{-2}] \div [-1,36 \cdot 10^{-1}]$	$[-7,96 \cdot 10^{-1}] \div [-1,02]$	$[-1,02]$	$[7,43]$	$[7,43]$
+ 50 %	$[-6,59 \cdot 10^{-2}]$	$[-6,59 \cdot 10^{-2}] \div [-4,46 \cdot 10^{-1}]$	$[-6,59 \cdot 10^{-2}]$	$[-4,46 \cdot 10^{-1}] \div [-8,25 \cdot 10^{-1}]$	$[-1,96] \div [-2,34]$	$[-2,34]$	$[6,94 \cdot 10^{-1}]$	$[6,94 \cdot 10^{-1}]$

Tabela 8. Prikaz rezultata CFD simulacione analize promjena dinamičkog pritiska na modelu

	Dinamički pritisak (Pa)							
Zone statičkog pritiska	VP OP Z ₅	Zona Š br.2 i Š br.3 i zona oko 50 m iza Š br.3	Š br. 3 (za 25% i za 50% i u Š br.2)	Križište Š br.2 i VP OP Z _{3-4/2}	VP OP Z _{3-4/2}	Dio VP OP Z _{3-4/2} na oko 10 m od križišta sa Š br.2	TP OP Z _{3-4/2}	Križište Š br.2 i TP OP Z _{3-4/2}
Po etno stanje	$[2,23 \cdot 10^{-1}] \div [1,48 \cdot 10^{-1}]$	$[3,58 \cdot 10^{-3}]$	$[3,58 \cdot 10^{-3}]$	$[-2,23 \cdot 10^{-1}] \div [-3,71 \cdot 10^{-1}]$	$[5,94 \cdot 10^{-1}] \div [6,98 \cdot 10^{-1}]$		$[2,23 \cdot 10^{-1}] \div [3,71 \cdot 10^{-1}]$	$[2,23 \cdot 10^{-1}]$
+ 25 %	$[2,48 \cdot 10^{-1}]$	$[4,08 \cdot 10^{-5}]$	$[8,27 \cdot 10^{-2}] \div [4,08 \cdot 10^{-5}]$	$[2,48 \cdot 10^{-1}] \div [4,14 \cdot 10^{-1}]$	$[5,79 \cdot 10^{-1}] \div [6,62 \cdot 10^{-1}]$		$[2,48 \cdot 10^{-1}] \div [5,79 \cdot 10^{-1}]$	$[2,48 \cdot 10^{-1}] \div [4,14 \cdot 10^{-1}]$
+ 50 %	$[1,54 \cdot 10^{-1}] \div [3,07 \cdot 10^{-1}]$	$[2,16 \cdot 10^{-4}]$	$[1,54 \cdot 10^{-1}] \div [2,16 \cdot 10^{-4}]$	$[4,61 \cdot 10^{-1}] \div [7,68 \cdot 10^{-1}]$	$[1,23]$		$[1,54 \cdot 10^{-1}] \div [9,22 \cdot 10^{-1}]$	$[4,61 \cdot 10^{-1}]$

Tabela 9. Prikaz rezultata CFD simulacione analize promjena statičkog pritiska na modelu

	Vektori brzine (m/s)							
Zone statičkog pritiska	VP OP Z ₅	Zona Š br.2 i Š br.3 i zona oko 50 m iza Š br.3	Š br. 3 (za 25% i za 50% i u Š br.2)	Križište Š br.2 i VP OP Z _{3-4/2}	VP OP Z _{3-4/2}	Dio VP OP Z _{3-4/2} na oko 10 m od križišta sa Š br.2	TP OP Z _{3-4/2}	Križište Š br.2 i TP OP Z _{3-4/2}
Po etno stanje	$[4,73 \cdot 10^{-1}] \div [5,91 \cdot 10^{-1}]$	$[3,01 \cdot 10^{-3}] \div [1,21 \cdot 10^{-1}]$	$[4,73 \cdot 10^{-1}]$	$[7,09 \cdot 10^{-1}]$	$[1,06]$		$[8,26 \cdot 10^{-1}]$	$[7,09 \cdot 10^{-1}]$
+ 25 %	$[6,25 \cdot 10^{-1}]$	$[4,17 \cdot 10^{-3}] \div [1,28 \cdot 10^{-1}]$	$[6,83 \cdot 10^{-1}] \div [8,52 \cdot 10^{-1}]$	$[8,74 \cdot 10^{-1}]$	$[1,12]$		$[9,98 \cdot 10^{-1}]$	$[8,74 \cdot 10^{-1}] \div [9,98 \cdot 10^{-1}]$
+ 50 %	$[8,52 \cdot 10^{-1}]$	$[8,32 \cdot 10^{-3}] \div [1,77 \cdot 10^{-1}]$	$[1,54 \cdot 10^{-1}] \div [2,16 \cdot 10^{-4}]$	$[4,61 \cdot 10^{-1}] \div [7,68 \cdot 10^{-1}]$	$[1,19]$		$[1,19] \div [1,36]$	$[1,02]$

U prethodnim tabelama predstavljen je statički pritisak po zonama uticaja, odnosno posmatranim grupama istog ili sličnog uticaja statičkog pritiska u području „dodira“ širokih elova u otkopnim poljima OP Z₅ i OP Z_{3-4/2}, što se smatra najnepovoljnijim područjem sa aspekta pojave oksidacionih procesa. Minimalni statički pritisak od $[-2,34]$ (Pa) uočen je u VP OP Z_{3-4/2} u fazi povećanja brzine, odnosno količine vazduha za 50 %, dok je maksimalna vrijednost od $[7,43]$ (Pa) uočena u TP OP Z_{3-4/2} na križištu Š br.2 i TP OP Z_{3-4/2} u fazi povećanja brzine vazduha odnosno količine vazduha od 25 %. Kada posmatramo razlike u statičkom pritisku, maksimalna razlika između najniže i najviše vrijednosti statičkog pritiska je za slučaj kada se količina dovednog vazduha povećava za 25 % te se vrijednost statičkog pritiska kreće od $[-1,02]$ (Pa) do $[7,43]$ (Pa), dok je minimalna razlika u slučaju koji smatramo po etničkim stanjem i iznosi $[-1,18]$ (Pa) do $[7,46 \cdot 10^{-1}]$ (Pa). Minimalni dinamički pritisak od $[-3,71 \cdot 10^{-1}]$ (Pa) uočen je na križištu Š br.2 i VP OP Z_{3-4/2} u fazi početnog stanja, dok je maksimalna vrijednost od $[1,23]$ (Pa) uočena u VP OP Z_{3-4/2} u fazi povećanja brzine vazduha odnosno količine vazduha od 50 %. Kada posmatramo razlike u dinamičkom pritisku, maksimalna razlika između najniže i najviše vrijednosti dinamičkog pritiska je za slučaj kada se količina dovednog vazduha povećava za 50 % te se vrijednost dinamičkog pritiska kreće od $[2,16 \cdot 10^{-4}]$ (Pa) do $[1,23]$ (Pa), dok je minimalna razlika u fazi povećanja brzine vazduha odnosno količine vazduha od 25 % i kreće se od $[4,08 \cdot 10^{-5}]$ (Pa) do $[6,98 \cdot 10^{-1}]$ (Pa).

Minimalna vrijednost vektora brzine od $[3,01 \cdot 10^{-3}]$ (m/s) uočena je u zoni Š br.2 i Š br.3 u zoni oko 50 m iza Š br.3 u fazi početnog stanja, dok je maksimalna vrijednost od $[1,19]$ (m/s) uočena u VP OP Z_{3-4/2} u fazi povećanja

količina vazduha od 50 %. Kada posmatramo razlike u vrijednostima vektora brzina, maksimalna razlika između u najniže i najviše vrijednosti vektora brzina je za slučaj kada se količina dovednog vazduha poveća za 50 % te se vrijednost vektora brzina kreće od $[8,32 \cdot 10^{-3}](\text{m/s}) \div [1,19](\text{m/s})$, dok je minimalna razlika u početnoj fazi i kreće se od $[3,01 \cdot 10^{-3}](\text{m/s}) \div [1,12](\text{m/s})$.

Prema ovim 3D modelima za statički i dinamički pritisak, i vektore brzine, uočena je zona uticaja (zona aeracije) u starom radu iza širokog elala broj 3 u granicama od 50 m. Kao posebno značajan element za analizu mora se uzeti kontaktna prostorija između dva štupa u trenutku kada mehanizovano štup dostigne poziciju klasičnog štupa, jer se eventualni uticaj strujanja vazduha u okviru ove zone, s obzirom na kretanje mehanizovanog širokog elala i njegovo približavanje klasičnim širokim elalima može otkrivati kao najizraženiji baš u zoni „dodira“. Uočeno je da su statički i dinamički pritisak u području iza širokog elala broj 3, odnosno u zoni aeracije vrlo blizu vrijednosti [0] (Pa), dok je vektor brzine sa maksimalnim vrijednostima do $[1,77 \cdot 10^{-1}](\text{m/s})$, te se može zaključiti da postoje uslovi za kontakt stijenskog masiva sa rudnim vazduhom u ovim prostorijama iako nema „aktivnog strujanja“. S tim u vezi „zonu aeracije“ treba promatrati kao nešto dužu zonu od same granice uticaja potencijala ventilatora ili aktivnog strujanja vazduha.

Dominantan vid strujanja u starom radu, a posebno u dijelovima gdje ima ostataka uglja sklonih oksidaciji, bit će jedan od vidova difuzionog strujanja, odnosno kao atomska difuzija, efuzija, termalna difuzija, osmoza, reverzna difuzija i samodifuzija.⁶

4. ZAKLJUČAK NA RAZMATRANJA

Termin „kinematska analiza napredovanja širokog elala“ predstavljen je kao matematski model kombinovane analize prostornih karakteristika širokog elalnog otkopa i njegove dinamike napredovanja. Razvijen je numerički model za proračun i simulaciju ventilacije kombinovana tri široka elala po metodi „Hardy-Cross“, te izvršena analiza različitih konfiguracija ventilacije širokog elalnih otkopa. Izvršen je proračun zapreminskih protoka, efektivnih pritisaka, parcijalne angažovane snage ventilatora u pojedinim rudnim prostorijama.

Za definisanu kinematsku šemu širokog elala i dinamiku napredovanja konstruisan je numerički trodimenzionalni model sa ciljem dinamičke „CFD“ (Computational Fluid Dynamics) analize definisane kinematike širokog elala i dinamike otkopavanja. Primjenom numeričkog obračuna raspodjele vazduha i softverskog paketa „VnetPC“ simulirani su ventilacioni odnosi za zatečeno stanje, te za slučaj povećanja potencijala ventilatora. Utvrđene su količine vazduha i pripadaju i potencijali koji su rezultat povećanja potencijala ventilatora. Predstavljeni su rezultati eksperimenata provedenih sa ciljem ispitivanja mogućnosti primjene kontrolisane recirkulacije kao mjere poboljšanja uslova i smanjenja požarnih opasnosti i termografske detekcije kao mjere ranog uočavanja požarne opasnosti na kontaktnim površinama u aktivnim prostorijama.

Utvrđena je potencijalna metoda za osiguranje željenih ventilacionih parametara na način da se osigura pouzdano upravljanje požarnim rizicima i ne ugrozi stabilna ventilacija rudnika u cijelini. Utvrđena je potencijalna metoda rane detekcije požarnih procesa koja se može primijeniti u operativnoj kontroli i osigurati pouzdano praćenje razvoja požarne opasnosti.

U kinematskoj analizi napredovanja širokog elala i dinamike otkopavanja utvrđeni su kritični elementi „susretanja“ širokog elalnih otkopa, odnosno uticaj intenziteta i faze napredovanja rudarskih radova na opštu sigurnost.

Kao posebno kritična faza identificirana je ona kada se očekuje da mehanizovano široko elalo dostigne postojeću otkopnu frontu klasičnih širokih elala, što iznosi nešto manje od 5 mjeseci od vremena pisanja predmetnog rada.

Dokazano je da kinematska analiza napredovanja širokih elala, a posebno ako se ne može isključiti međusobni ventilacioni uticaj dva ili više otkopnih polja, može ukazati na povećanje požarne opasnosti. Neadekvatna usklađenost dinamike napredovanja može višestruko povećati vrijeme vazdušne ekspozicije potencijalnih požarnih žarišta. Ovisno o uslovima u kojim se odvija eksploatacija, moguće su pojave oksidacionih žarišta kojih, u slučaju ako bi se otkopavalo samo jedno otkopno polje, ne bi bilo.

Uočimo li zonu oko širokog elalnog otkopa u kojoj je prisutno prostrujavanje vazduha, odnosno do koje dopire uticaj potencijala ventilatora, možemo govoriti i o „geometriji prostora koji je pod uticajem ventilacije“. Ovaj prostor je znatno veći od geometrijske forme koju formiraju pripreme i otkopne prostorije. Međusobna interakcija zona koje su pod uticajem ventilacije utiče na požarnu opasnost, a na način i obim međusobnog uticaja različitih otkopa mogu se analizirati samo ukoliko se kompleksno analiziraju kinematski i dinamički parametri svih aktivnih radilišta.

⁶ Izvor: Mehanika fluida, klimatologija i aerologija, Knjiga 1: Osnove mehanike fluida i filtraciona strujanja, E. Deli, A. Bašić, R. Šišić

CONCLUSIONS

The term longwall kinematic analysis and is defined and mathematically presented as a combined analysis of spatial characteristics of longwall excavation and its dynamic progress. Numerical model for ventilation analysis and simulation by „Hardy-Cross“ method is developed, and analysis of different longwall excavation ventilation configurations was performed. Volume flow, effective pressure, partial fan engaged power in certain mine rooms was calculated.

For defined longwall kinematics and excavation dynamics a numerical three-dimensional model with the goal of dynamic „CFD“ (Computational Fluid Dynamics) analysis of defined longwall kinematics and mining dynamics is constructed. By applying numerical calculation of air distribution and software package „VnetPC“ ventilation relations for existing situation was simulated, and for case of increased fan potential. Air amount and related potentials which are the result of increased fan potential were determined. Presented are results of experiments carried out to study the possibilities of controlled recirculation application as measure to improve conditions and reduce fire hazards and thermographic detection as measure of early detection of fire danger on contact surfaces in active working areas.

Potential method for ensuring desired ventilation parameters in a way to ensure reliable fire risk management and not to endanger stable ventilation of the mine as a whole was established. Potential method for early detection of fire process is found that can be applied in operational control and ensure reliable monitoring of the fire danger development.

As a method of ensuring the necessary amount of air, experimentally was confirmed that the controlled recirculation can provide significantly greater air quantities without necessary additional investments and without affecting the rest of the ventilation system. Controlled recirculation provides the ability to manage fire risks indirectly by controlling potentials, or absolute air pressure in the mine rooms and old workings.

In the analysis of longwall kinematics and excavation dynamics critical elements of „meeting“ longwall excavations were identified, and the impact of the intensity and phase of mining operations progress to general safety.

As a particularly critical phase was identified when it is expected that mechanized longwall catch up with existing classic longwall mining front, which is slightly less than 5 months from the time of this paper writing.

It has been proven that longwall kinematics and progress dynamics, especially if we can not exclude the mutual ventilation influence of two or more mining fields, has a direct influence on fire hazard. Inadequate dynamics progress harmonization can increase air exposure period of potential fire hotspots. Depending on the conditions in which exploitation takes place, occurrence of oxidation hot spots are possible which in the case of one field excavation, would not occur.

If we identify a broad zone around longwall working where the airflow is present, and in the reach of fans potential impact, we can talk about „the geometry of space, which is under the influence of ventilation“. This space is much larger than the geometric form which is formed by preparation and excavation rooms. Mutual interaction of zones which are under an impact of ventilation affect the fire danger, and the manner and scope of interaction between the various excavation sites can be analyzed only by complex analysis of the kinematic and dynamic parameters of all active workings.

REFERENCE

1. DRP montaže i otkopavanja uglja u otkopnom polju Z5 u prvom zahvatu sa jednim pojasem (jedno široko elo) u Rudniku "Podzemna eksploatacija" RMU "Banovi i" d.d. Banovi i, RI Tuzla u decembru 2012.godine.
2. DRP Rudarsko-geoloških istraživanja sjevernog revira rudnika "Podzemna eksploatacija" RMU "Banovi i", RMU „Banovi i“.
3. Delic E., Basic A., Sisis R.: Case Study of CFD Simulation in Mining Accident Investigation; 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium; The Pennsylvania State University, SAD, June 5-7, 2006.
4. Delic E, Basic A., Sisis R.: CFD simulation of the auxiliary fan interference in underground coal mining areas, APCOM 2005 (Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry), Taylor and Francis Group plc, London, UK, 2005.
5. Delic E, Sisis R., Basic A.: Numerical Analysis of the Controlled Air Recirculation Interference to the Explosive and Toxic Gasses Hazards in Underground Coal Mines; 9th International Research/Expert Conference «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology», TMT 2005; Antalya, Turkey, 26-30 Sept, 2005.
6. Todorovi N.: Model detekcije ventilacionih hazarda i procjena ventilacionih rizika Rudnika „Podzemna eksploatacija“ RMU Banovi i, magistarski rad, Rudarsko-geološko-gra evinski fakultet Tuzla 2007.
7. Todorovi N.: Upravljanje ventilacionim požarnim rizicima mehanizovanog otkopavanja ugljenih slojeva velike mo nosti u RMU „Banovi i“, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-gra evinski fakultet Tuzla, 2013.
8. Tehni ko-tehnološki program pove anja proizvodnje i mehanizovanja tehnološkog procesa rada u Rudniku "Podzemna eksploatacija" RMU "Banovi i", RI Tuzla.
9. Adilovi A.: Istraživanje uticaja na ina otkopavanja široko elnom otkopnom metodom na pojavu endogenih požara u rudnicima mrkog uglja, doktorska disertacija, RGGF Tuzla.
10. Elaborat o ispitivanju zapaljivih i eksplozivnih osobina ugljene prašine, kategorizaciji jame i klasifikaciji jamskih prostorija po stepenu opasnosti od opasne ugljene prašine 2007. godine.