



Kvaliteta zraka i mikroklimatski parametri pri iskopu tunela Mala Kapela

Air Quality and Microclimatic Parameters During Excavation of Mala Kapela Tunnel

*Mario Klanfar¹; Darko Vrkljan¹; Miroslav Lončarić

¹Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

²Stjepana Radića 65, 48305 Reka, Hrvatska

Sažetak

Glavni izvori opasnih i štetnih plinova pri iskopima tunela i podzemnih prostorija su miniranje te upotreba opreme pogonjene dizelskim motorima. U radu su analizirani podaci mjerenja emisija štetnih plinova te korelirani s uobičajenim radnim procesima pri iskopima tunela. Potvrđeno je da se najveće koncentracije javljaju pri miniranjima, a zatim pri utovaru i transportu, uslijed kojih koncentracije također i rastu iznad MDK. Određen je pad dobave zraka s duljinom ventilacijske cijevi, uslijed čega određeni plinovi pokazuju porast koncentracija. Mjereni podaci mikroklimatskih parametara u tunelu korelirani su s godišnjim dobom, udaljenošću od ulaznog portala te međusobno. Utvrđeno je da temperatura zraka na radilištima najviše zavisi o godišnjem dobu. I vanjskom zraku koji se ventilacijom dobavlja u tunel. Relativna vlažnost zraka ima nasumični karakter, tj. nisu utvrđene zavisnosti, osim da je unutar tunela vlažnost u prosjeku viša i manje promjenjiva nego vanjska. Za tlak zraka u tunelu utvrđeno je da odgovara vanjskom atmosferskom tlaku, odnosno postoji normalni pad tlaka s udaljenošću od portala kako niveleta tunela mijenja nadmorsku visinu.

Ključne riječi

iskop tunela, kvaliteta zraka, mikroklima, štetni plinovi, ventilacija

I. Uvod

Iskopi tunela u krškim područjima sučeljavaju se s čestim izmjenama geoloških formacija. Iz ovog razloga najčešće primjenjivana metoda iskopa je Nova Austrijska Tunelska Metoda (NATM). Velika većina tunela u Republici Hrvatskoj izgrađeni su ovom metodom uz primjenu bušenja i miniranja, što se pokazalo optimalnim zbog fleksibilnosti u promjenjivim formacijama i uvjetima iskopa (Mustapić, 2012).

Metoda iskopa usko je povezana s primjenjivanom mehanizacijom i sredstvima, a time i štetnim plinovima koji se pojavljuju u radnom prostoru. Uobičajeni ciklus iskopa tunela uključuje bušenje i miniranje, vjetrenje, utovar i izvoz odminirane stijene, kavanje, te ugradnju primarne podgrade.

Iz ovih radnih procesa proizlaze i glavni izvori štetnih plinova, tj. eksplozivna sredstva pri miniranju te primjena dizel strojeva pri utovaru i izvozu. Emisija štetnih plinova pri miniranju zavisit će o vrsti i količini eksploziva, a pri ostalim radnim procesima o ukupno angažiranoj snazi dizel strojeva. Pri utovaru i izvozu angažirana je najveća ukupna snaga dizel mehanizacije, budući uključuje utovarivač i dva ili više kamiona. Ostali radni procesi zahtijevaju manju ukupnu snagu dizel mehanizacije, tj. pri kavanju najčešće jedan bager (hidraulični čekić), pri ugradnji čeličnih elemenata podgrade teleskopski viličar, a pri ugradnji mlaznog betona kamion mikser. Bušača garnitura i stroj za ugradnju mlaznog betona najčešće su pogonjeni električnom energijom, ali u slučaju da ne postoji električna mreža koriste se dizel agregati.

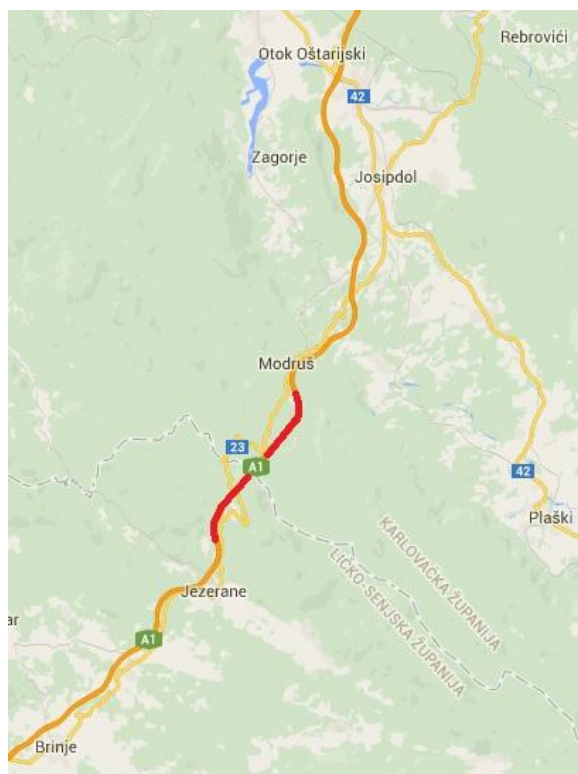
*Corresponding author: Mario Klanfar
mario.klanfar@rgn.hr

1.1. Štetni plinovi

Štetni plinovi koji se pojavljuju uslijed redovnih radova, isključujući nezgode i eventualne pojave podzemnih plinova, tj. produkti detonacije eksploziva te izgaranja goriva su ugljikovi, dušikovi i sumporovi oksidi te aldehidi.

Količina plinova koja se stvara pri miniranjima kreće se od 500 do 1000 l/kg eksploziva. Stvarnu količinu plinova i njihove udjele teško je predvidjeti jer zavise o vrsti eksploziva ali i o uvjetima detonacije (Jovičić et al., 1987). Glavna štetna komponenta ispuha modernih dizel motora je ugljični dioksid s udjelom od tipično 8 %. Ostali prethodno spomenuti štetni plinovi čine skupno manje od 0,2 % ispušnih plinova (NGK, 2014), međutim zbog visoke toksičnosti i pri vrlo malim koncentracijama predstavljaju veću opasnost.

U radu su izloženi i analizirani podaci o koncentracijama štetnih plinova, te ventilacijskim i mikroklimatskim parametrima mjerenim na podzemnim radilištima prilikom iskopa tunela Mala Kapela, čija lokacija je prikazana slikom 1.



Slika 1. Lokacija tunela Mala Kapela

Figure 1. Location of the Mala Kapela tunnel

1.2. Dopuštene koncentracije štetnih plinova

Dopuštene koncentracije štetnih plinova u radnom prostoru regulirane su u Republici Hrvatskoj kroz dva pravilnika. Pravilnik o tehničkim normativima za strojeve s dizelskim motorima koji se upotrebljavaju pri podzemnim rudarskim radovima u nemetanskim jamama (SL 24/91) je stariji pravilnik, ali važeći u domeni rudarstva. Danas važeći Pravilnik o graničnim vrijednostima izloženosti opasnim tvarima pri radu i o biološkim graničnim vrijednostima (NN 13/09) nedavno je zamijenio Pravilnik o maksimalno dopustivim koncentracijama štetnih tvari u atmosferi radnih prostorija i prostora i o biološkim graničnim vrijednostima (NN 92/93).

Pravilnici različito tretiraju dopuštene koncentracije zasebnih tvari, međutim ovaj posljednje navedeni je najkonzervativniji za štetne plinove mjerene u tunelu Mala Kapela i istovremeno daje vrijednosti bliske preporučenima od strane svjetskih instituta (NIOSH, 2007). Stoga će one biti upotrijebljene u analizama u ovom radu. Za usporedbu, u **tablici 1** prikazane su dopuštene koncentracije prema različitim izvorima.

Tablica 1. Dopuštene koncentracije mjerenih plinova**Table 1.** Permissible exposure limits for measured gases

Plin	MDK (SL 53/90)	MDK (NN 92/93) (NIOSH, 2007)	GVI (NN 13/09)
CO	50 ppm	30 ppm	30 ppm
CO ₂	5000 ppm	5000 ppm	5000 ppm
NO	25 ppm	25 ppm	50 ppm
NO ₂	5 ppm	3 ppm	3 ppm
MDK – Maksimalno dopuštena koncentracija GVI – Granična vrijednost izloženosti			

2. Mjerenja kvalitete zraka, ventilacijskih i mikroklimatskih parametara

Tunel Mala Kapela građen je paralelno u obje cijevi i istovremeno iz smjera sjevernog i južnog ulaznog portala. U periodu od studenog 2002. do travnja 2004. obavljana su mjerenja štetnih plinova, mikroklimatskih parametara i protoka zraka u 17 navrata (serija), paralelno napretku tunela (Janković et al., 2003). Uz napredak četiriju čela tunela, mjerenjima je dobiven veći broj podataka pri različitim stacionažama, odnosno duljinama tunelskih cijevi i ventilacijskih cijevi, i pri različitim radnim procesima (**tablica 2**).

Od štetnih plinova koji se pojavljuju pri iskopima tunela obavljena su mjerenja koncentracije ugljikovog monoksida (CO) i dioksida (CO₂) te dušikovog monoksida (NO) i dioksida (NO₂). Mjerenja su se odvijala kontinuirano za vrijeme trajanja pojedinih radnih procesa, čime je dobivena vremenska raspodjela koncentracija štetnih plinova. Pri tome je korišten detektor Drager Multiwarn II, opremljen infracrvenim senzorom za ugljikov dioksid te elektrokemijskim senzorima za ostale navedene plinove.

Tablica 2. Vrste i broj mjerenja**Table 2.** Type and number of measurements

Vrsta mjerenja		Broj serija/mjernih točaka
Štetni plinovi	Bušenje	6/6
	Miniranje	10/16
	Utovar i izvoz	11/18
	Ostalo	5/5
Mikroklimatski i parametri	Tlak	15/64
	Temperatura	8/41
	Vlažnost	14/64
Protok zraka		11/25

Od mikroklimatskih parametara mjerni su atmosferski tlak, te temperatura i vlažnost zraka, za što su korišteni aneroidni barometar i psihrometar Wilh Lambrecht GmbH. Na ušćima ventilacijskih cijevi prema čelima tunelskih cijevi mjerene su brzine strujanja zraka, gdje je uz poznati presjek ventilacijskih cijevi dobiven protok zraka prema čelima-radilištima. Za mjerenje brzine zračne struje korišten je krilni anemometar Wilh Lambrecht GmbH.

2.1. Uvjeti mjerenja

Sva mjerenja koncentracije plinova kod miniranja te utovara i izvoza obavljena su uz uključen ventilacijski sustav. Ventilacijski sustav izveden je aksijalnim ventilatorima tlačnog djelovanja, snage 33 kW te fleksibilnim PVC ventilacijskim cijevima promjera 1600 mm. Mjerenja su izvođena na način da je instrument postavljen nedaleko ušću ventilacijske cijevi, radi sigurne udaljenosti od mjesta miniranja te kako bi onečišćeni zrak strujao pored instrumenta. Pri tome se udaljenost ušća ventilacijske cijevi, a time i instrumenta od radnog čela kretala između 42 i 195 m, te u prosjeku iznosi 86,5 m.

Količina eksploziva pri miniranju bila je zavisna o kategoriji stjenske mase, tj. duljini bušotina za jedan napredak i broju minskih bušotina. Naime, pri određenim mjerenjima plinova izvođeno je istovremeno miniranje glavnog čela i poprečnog prolaza, ili se pak stacionaža čela nalazila na mjestu predviđenom za zaustavnu nišu tunela, zbog čega je poprečni presjek povećan. U oba je slučaja količina eksploziva bila nešto veća nego pri uobičajenom miniranju čela. Pri mjerenjima koncentracija plinova količina eksploziva kretala se u rasponu od 225 do 619 kg, uz prosjek od 448 kg. Iniciranje eksplozivnog punjenja izvođeno je neelektričnim sustavom, a od eksploziva su uglavnom korišteni emulzijski eksploziv elmulexal $\Phi 38$ i vodoplastični eksploziv danubit $\Phi 38$ za glavne i pomoćne bušotine, te elmulex $\Phi 25$ za konturne bušotine.

U utovaru i izvozu sudjeluju jedan utovarivač i više kamiona istresaća. Korišteni utovarivači su Fiat-Hitachi 220.2 i O&K L45, svaki snage 260 kW. Od kamiona su korišteni Mercedesovi modeli 2632, 2628 i 2626, čije snage motora se kreću u rasponu od 206 do 238 kW. Kako se na radnom čelu istovremeno nalaze utovarivač i jedan kamion, može se smatrati da najveća snaga dizel strojeva iznosi 498 kW.

Pri bušenju minskih bušotina korištena je bušilica Atlas Copco Rocket Boomer WL3C pogonjena električnim motorima, međutim napajana el. energijom iz prenosivog dizel agregata Olympian G130, snage 130 kW. Ovaj agregat bio je glavni izvor štetnih plinova pri bušačkim radovima. Pri ostalim radovima su od strojeva veće snage korišteni bageri Caterpillar 325LN snage 190 kW te kamioni mikseri snage 235 kW.

3. Analize podataka

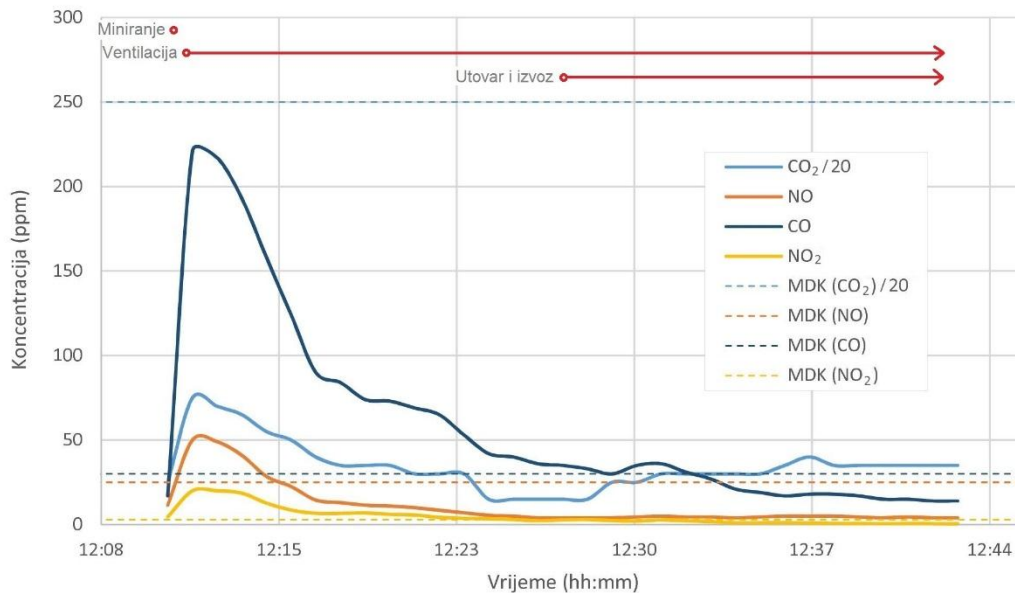
3.1. Kvaliteta zraka

Tipični dijagram koncentracija plinova pri jednom napretku čela prikazan je **slikom 2**. Vidljiv je nagli porast koncentracija svih mjerenih plinova neposredno nakon miniranja. Uobičajeno se nakon miniranja pušta u pogon ventilacijski sustav, uslijed čega dolazi do brzog razrjeđenja koncentracija štetnih plinova u periodu od 15 do 25 minuta. Nakon tog perioda koncentracije su dovoljno niske da se pristupi utovaru i izvozu. Tijekom utovara i izvoza koncentracije plinova emitiranih detonacijom eksploziva nastavljaju padati zbog rada ventilacijskog sustava, ali postoje dodatne emisije zbog primjene dizel mehanizacije. Nakon toga plinovi su emitirani isključivo iz motora dizel mehanizacije te koncentracije ostaju relativno konstantne sve do završetka utovara i izvoza.

Većinom obavljenih mjerenja koncentracija plinova obuhvaćeni su upravo miniranje te utovar i izvoz kao radni procesi s najvećim emisijama plinova. Manji broj mjerenja izveden je za vrijeme ostalih radova, tj. bušenja minskih bušotina, kavanja i ugradnje primarne podgrade.

Koncentracije plinova za vrijeme ovih ostalih radova rijetko prelaze dopuštene vrijednosti, a za razliku od miniranja ne pokazuju nagle skokove već umjereno variraju za vrijeme obavljanja rada. Iznimno u ovom slučaju dolazilo je do pojave štetnih plinova prilikom bušenja minskih bušotina zbog napajanja bušilice el. energijom iz dizel agregata. Pri ostalim radovima nisu zabilježene visoke koncentracije štetnih plinova niti prekoračenje MDK vrijednosti, te stoga nisu uključeni u dalju analizu.

Svi podaci koncentracija plinova su kontinuirani i u vremenskom zapisu. Stoga su obrađeni na način da je uz poznato vrijeme početka pojedinog radnog procesa zabilježena maksimalna koncentracija za vrijeme trajanja istog. Ukoliko koncentracija prelazi MDK vrijednosti, zabilježen je vremenski period do ponovnog pada koncentracije ispod MDK, što je pripisano istom radnom procesu kao vrijeme razrjeđenja pojedinog plina. Pri tome su za granice MDK usvojene strože vrijednosti iz **tablice 1**, prema Pravilniku (NN 92/93).



Slika 2. Tipični vremenski dijagram koncentracije plinova nakon miniranja

Figure 2. Typical time diagram of gases concentration after blasting

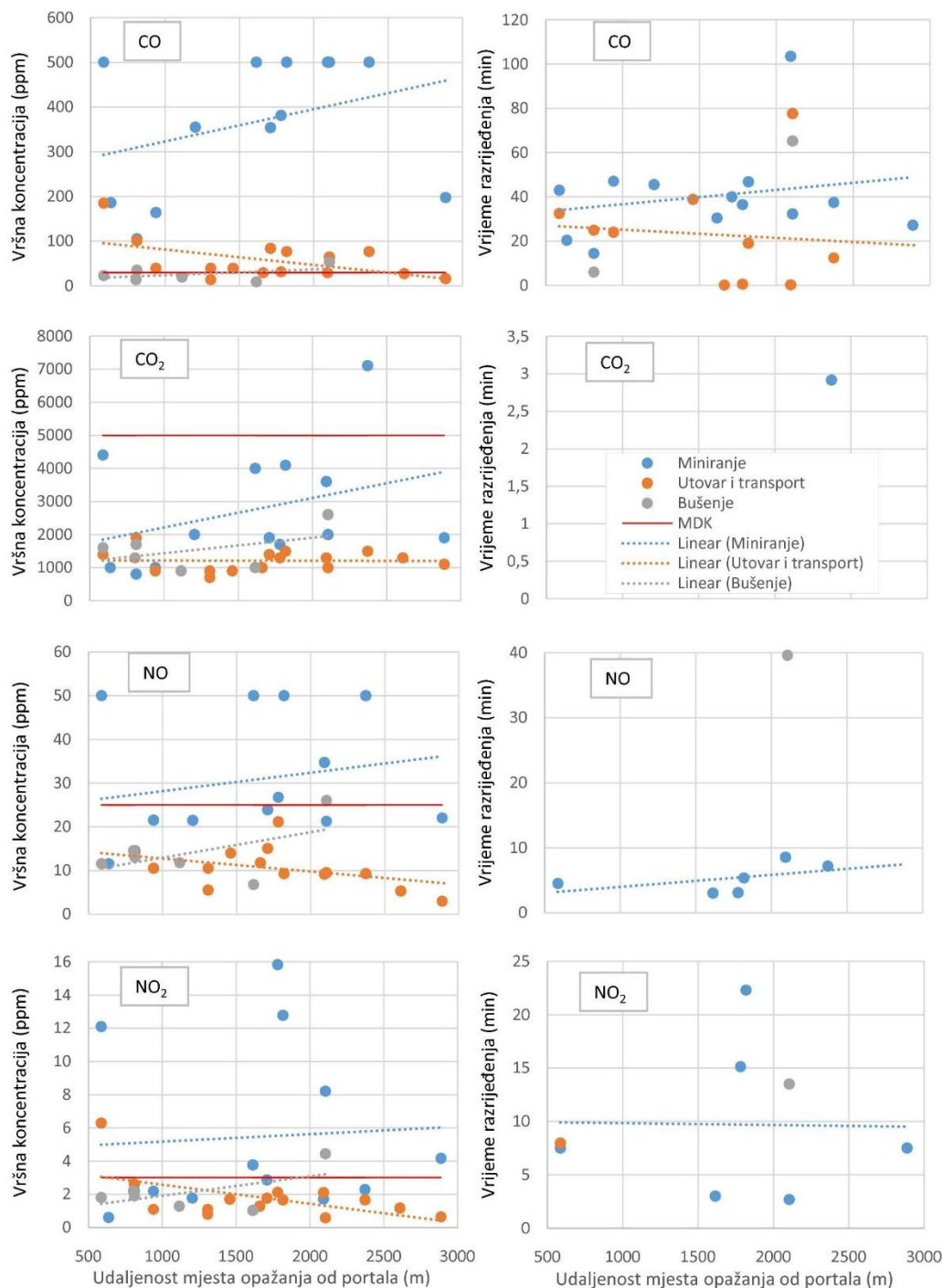
Dijagrami na **slici 3** prikazuju najviše koncentracije zabilježene za vrijeme opažanja i vrijeme razrijeđenja pojedinih plinova ispod MDK za tri radna procesa u kojima se pokazalo prekoračenje dopuštenih koncentracija, tj. bušenje minskih bušotina, miniranje te utovar i izvoz. Podaci su na apsisci smješteni prema udaljenosti mjerne točke od ulaznog portala tunela, što posredno predstavlja napredak radnog čela i produljenje ventilacijske cijevi, kako bi se iskazala zavisnost koncentracija i vremena razrijeđenja o napretku čela.

Valja napomenuti kako su u više slučajeva koncentracije ugljičnog monoksida i dušičnog monoksida premašile mjerni opseg senzora, koji iznosi 500 ppm za CO i 50 ppm za NO. Ovi slučajevi su jasno uočljivi na dijagramima kao niz točaka pozicioniranih na istom iznosu ordinate. Budući je u tim slučajevima stvarna koncentracija nepoznata, korelacija je izvedena s gornjom granicom mjernog opsega, uz pretpostavku da stvarna koncentracija ne prelazi znatno iznad te granice.

Najveće koncentracije štetnih plinova i najdulje vrijeme potrebno za smanjenje koncentracija ispod MDK postižu se pri miniranju. Pri tome koncentracija ugljičnog monoksida uvijek prelazi granicu MDK i pokazuje najdulje vrijeme razrijeđenja od prosječno 40 min. Dušikovi oksidi prelaze MDK u 46 % slučajeva ali pokazuju relativno kratko prosječno vrijeme razrijeđenja od 5 do 10 min. Koncentracija ugljikovog dioksida je prešla MDK samo pri jednom mjerenju uz vrijeme razrijeđenja ispod 3 min.

Pri utovaru i izvozu zabilježene su koncentracije ugljičnog monoksida iznad MDK u 67 % slučajeva. Dušikovog dioksida samo pri jednom mjerenju, a ostali plinovi ne prelaze MDK. Pri tome CO pokazuje prosječno vrijeme razrijeđenja od 23 min.

Bušenje minskih bušotina u pravilu ne predstavlja problem u smislu štetnih plinova budući se pretežito izvodi strojevima na električni pogon. Međutim u ovom slučaju postoji izuzetak zbog korištenja dizel agregata. Zabilježena su prekoračenja MDK za ugljični monoksid te dušikove okside, i to CO u 2 od 6 mjerenja (33%), a za NO i NO₂ pri samo jednom mjerenju. Navedeni plinovi zadržali su koncentraciju iznad MDK u periodu 13 do 40 minuta.



Slika 3. Vršne koncentracije i vrijeme razrjeđenja štetnih plinova

Figure 3. Peak concentrations and dilution time of harmful gases

U **tablici 3** sažeta je učestalost prekoračenja MDK i prosječno vrijeme razrjeđenja plinova po radnim procesima. Prosječno vrijeme računato je kao srednja vrijednost svih slučajeva u kojima dolazi do prekoračenja MDK.

U korelaciji s napretkom čela, odnosno udaljenošću od portala i duljinom ventilacijskih cijevi, plinovi većinom pokazuju trend rasta vršnih koncentracija pri miniranjima te bušenju minskih bušotina. Isto se može primijetiti i za vrijeme razrjeđenja plinova. Budući su izvori štetnih plinova pri ovim radnim procesima uvijek lokalizirani na čelu

tunela, porast vršnih koncentracija i vremena razrijeđenja uzrokovani su sve većim otporima strujanju i gubicima zraka kako se duljina ventilacijskih cijevi povećava, a s time i dobava svježeg zraka prema radnim čelima.

Nasuprot tome, kod utovara i izvoza postoji trend smanjenja vršnih koncentracija i vremena razrijeđenja plinova s napretkom čela tunela. Ovo se vjerojatno može pripisati produljenju ciklusa izvoza, zbog čega se manji broj kamiona istovremeno nalazi u blizini čela, a moguća je i pojava čekanja utovarivača pri čemu pogonski motor radi u slobodnom hodu te su emisije plinova smanjene.

Tablica 3. Učestalost prekoračenja MDK i prosječno vrijeme razrijeđenja plinova

Table 3. Frequency of excursions beyond PEL and average time of dilution of harmful gases

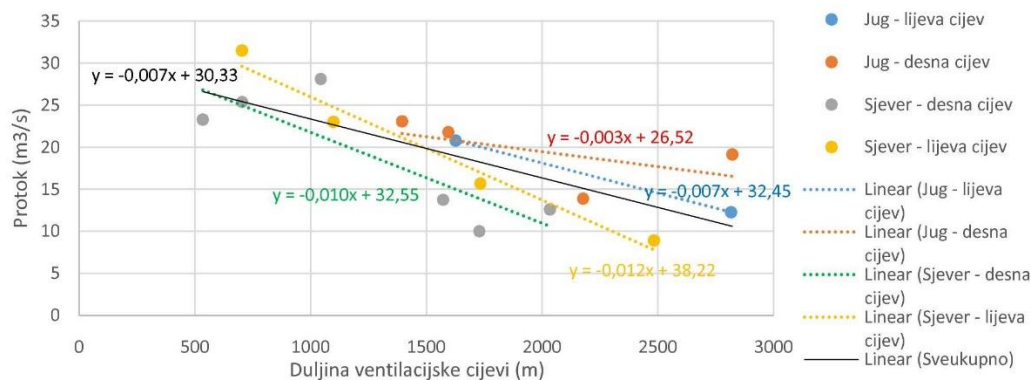
Radni proces	Plin	Učestalost iznad MDK (%)	Prosječno vrijeme razrijeđenja (min)
Bušenje	CO	33,3	35,6
	CO ₂	0	-
	NO	16,7	39,6
	NO ₂	16,7	13,5
Miniranje	CO	100	40,4
	CO ₂	7,7	2,9
	NO	46,2	5,28
	NO ₂	46,2	9,7
Utovar i izvoz	CO	66,6	23,1
	CO ₂	0	-
	NO	0	-
	NO ₂	6,7	8

3.2. Dobava zraka na radno čelo tunela

Na sva četiri radna čela zrak se dobavlja ventilatorima sličnih karakteristika i ventilacijskim cijevima istoga tipa i promjera. Međutim radi se o četiri odvojena sustava ventilacije koji su specifični u svojim lokalnim otporima strujanju zraka, te lokalnim gubicima zraka na spojevima i eventualnim mjestima oštećenja ventilacijskih cijevi. Stoga su podaci o protoku na ušćima ventilacijskih cijevi obrađeni zasebno za svako radno čelo.

Napretkom tunela povećavaju se otpori strujanju i gubici zraka zbog duljine ventilacijske cijevi, što umanjuje dobavne količine zraka. Manje dobavne količine mogu uzrokovati povećanje koncentracija štetnih plinova i povećanje vremena razrijeđenja, što u konačnici nakon miniranja zahtjeva dulji period rada ventilacijskog sustava prije ulaska mehanizacije za utovar i izvoz.

Mjereni protoci u odnosu na duljinu ventilacijske cijevi prikazani su **slikom 4**, zasebno za četiri radna čela. Linearnom regresijom dobiveni su trendovi smanjenja dobave zraka, koji se kreću između 0,3 i 1,2 m³/s, uz srednju vrijednost od 0,7 m³/s na 100 m' ventilacijske cijevi. U skladu s padom dobave svježeg zraka, u prethodnom poglavlju je utvrđen porast koncentracija i vremena razrijeđenja plinova pri miniranjima te bušenju minskih bušotina.



Slika 4. Trend pada protoka zraka s duljinom ventilacijskih cijevi

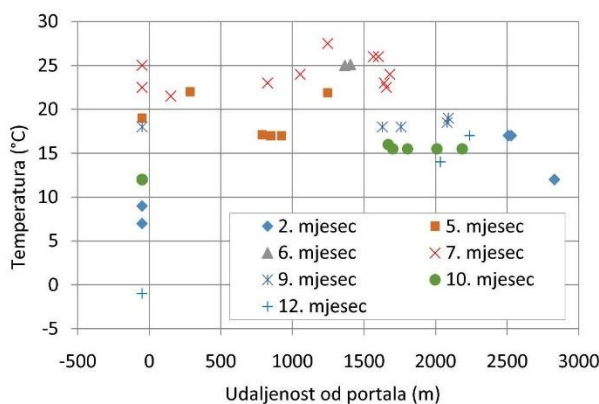
Figure 4. Trend of air flow drop in relation to ventilation duct length

3.3. Mikroklimatski parametri

Mjereni mikroklimatski parametri, temperatura, vlažnost i tlak zraka korelirani su sa stacionažom tunela i vremenom mjerenja da bi se utvrdilo postojanje li njihove međuzavisnosti.

Usporedbom temperature na različitim stacionažama tunela unutar kraćih vremenskih perioda do nekoliko sati (ista serija mjerenja), za koje se pretpostavlja da dnevne promjene vanjske temperature ne utječu na temperaturu unutar tunela, utvrđeno je da je uzduž tunela temperatura relativno konstantna, tj. neovisna o stacionaži. Stoga su svi izmjereni podaci promatrani u dužim vremenskim intervalima. Dijagram na **slici 5** prikazuje izmjerene temperature na različitim stacionažama i svrstane u mjesec u kojem su obavljena mjerenja. Uočljivo je da se na pojedinim stacionažama temperature razlikuju iz mjeseca u mjesec a malo variraju uzduž tunela. Iako postoje razlike i unutar pojedinog mjeseca, može se zaključiti da generalno temperatura na radilištima zavisi o vanjskoj temperaturi, tj. dobu godine. Najviše temperature unutar tunela, 22 do 27,5 °C izmjerene su tijekom 7. mjeseca kada su i izvan tunela zabilježene najviše temperature. Najniže temperature unutar tunela, 12 do 17 °C izmerene su u 2. i 12. mjesecu, kada i vanjske temperature postižu minimum.

Pri mjerenjima obavljanim u istoj seriji postoje razlike u temperaturama unutar tunela i vanjske temperature mjerene ispred portala. Na dijagramu je uočljivo da se i razlika između temperature unutar tunela i vanjske temperature mijenja s dobom godine.



Slika 5. Temperatura zraka izmjerene na radilištima tunela

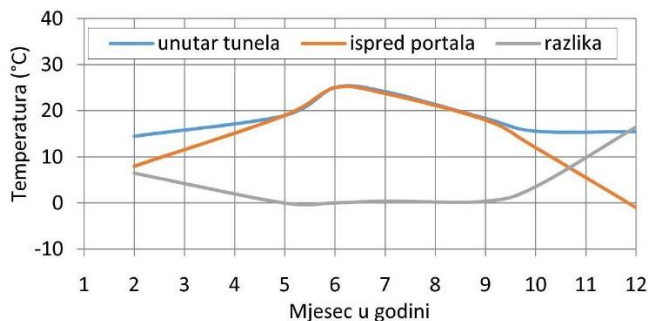
Figure 5. Temperatures measured at tunnel workplaces

U dijagramu na **slici 6** prikazani su usrednjeni temperaturni podaci za pojedini mjesec, unutar tunela i ispred portalnog ulaza, te njihova razlika. U periodu od 5. do 9. mjeseca su temperature gotovo izjednačene, dok je u ostatku godine

vanjska temperatura niža u odnosu na unutrašnjost tunela. Razlika se povećava u zimskom periodu i postiže maksimum tijekom 12. i 1. mjeseca.

Temperatura stijene može se procijeniti na temelju stalne prosječne temperature za dubine od 25-30m, koja iznosi 9 °C, i geotermijskog gradijenta od 0,03 °C/m dubine (Teply, 1990). Uz najveći nadsloj tunela Mala Kapela od 433m (Nadilo, 2004), stalna temperatura stijene trebala bi biti između 9 i 21 °C.

Kako nisu primijećene temperaturne promjene po duljini tunela, tj. ovisno o visini nadsloja, varijacija temperature na radilištima ovisi o temperaturi vanjskog zraka koji se ventilacijskim sustavom dobavlja u unutrašnjost tunela.



Slika 6. Temperaturne razlike zavisne o godišnjem dobu

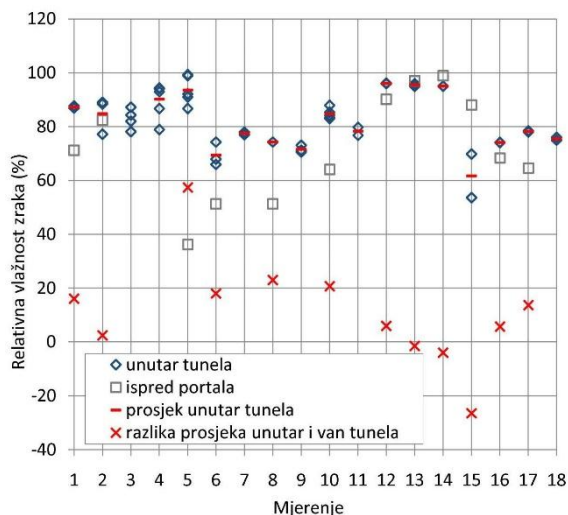
Figure 6. Temperature differences related to seasons

Podatke o vlažnosti zraka pokušalo se korelirati sa stacionažom tunela i godišnjim dobom na isti način kao i podatke o temperaturi, međutim bez uočenih pravilnosti. Mjerenja vlažnosti izvedena u istoj seriji ne pokazuju ovisnost o stacionaži tunela a podaci svrstani po datumima mjerenja ne pokazuju sezonski karakter, kakav je uočen kod temperature zraka.

Uočava se razlika u vlažnosti zraka unutar tunela i izvan njega, mjerena u istoj seriji. Dijagram na slici 7 prikazuje relativne vlažnosti zraka u slijedu kako su izvođene serije mjerenja. Dijagram sadrži vlažnosti izmjerene unutar tunela i njima pripadajuće srednje vrijednosti, vlažnosti zraka izvan tunela, te razliku srednje vlažnosti unutar i izvan tunela. Može se primijetiti da je u velikoj većini serija vlažnost zraka veća unutar tunela, dok je samo u tri serije obratno. Sveukupno, relativna vlažnost zraka unutar tunela kretala se u rasponu od 53,6 % do 99,3 %, uz prosječnu vrijednost 81,8 %. Izvan tunela vlažnost zraka se kretala u rasponu od 36% do 99%, uz prosječnu vrijednost od 70,5 %. Razlika u vlažnosti zraka unutar i izvan tunela kretala se u rasponu od -26,4 % do 57,4 %, te je u prosjeku unatarnji zrak bio za 11,8 % vlažniji.

Promjenom relativne vlažnosti vanjskoga zraka ne dolazi do promjene vlažnosti zraka unutar tunela, tj. nije uočena proporcionalna zavisnost. Ipak, vidljivo je da su varijacije u vlažnosti unutarnjeg zraka manje nego vanjskoga. Za pretpostaviti je da je vlažnost zraka u podzemlju relativno konstantna i da vanjski zrak dobavljan ventilacijskim sustavom malo utječe na njen iznos, ali do određenih promjena dolazi uslijed promjene temperatura i radnih procesa koji mogu povećati vlažnost zraka. Miniranja i rad dizel strojeva emitiraju vodenu paru, međutim mikroklimatski parametri nisu korelirani s radnim procesima zbog male vremenske i prostorne koincidencije mjerenih podataka s radnim procesima.

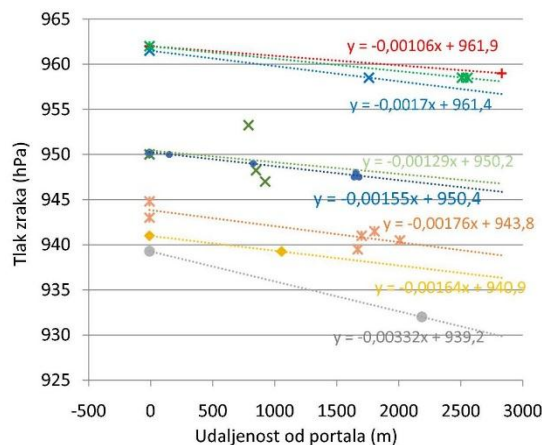
Prijelomnica tunela se nalazi na sredini između sjevernog i južnog portala, a prema kotama prijelomnice u odnosu na portale postoji visinska razlika od 31 m za sjeverni portal i 42 m za južni portal (Nadilo, 2004). Ovo bi uz standardnu gustoću zraka od 1,2 kg/m³ trebalo davati promjenu tlaka od 0,12 Pa/m' od južnog, odnosno 0,17 Pa/m' od sjevernog portala. Ovakvo definirane vrijednosti dobro se poklapaju s rezultatima linearne regresije tlakova provedene za serije u kojima postoji veći broj podataka na međusobno udaljenijim stacionažama unutar tunela i podatak izvan tunela. Regresija pokazuje pad tlaka između 0,1 i 0,3 Pa/m uz srednju vrijednost od 0,17 Pa/m duljine tunela.



Slika 7. Vlažnost zraka mjerena na radilištima

Figure 7. Humidity measured at tunnel workplaces

Izmjereni barometarski tlakovi (**slika 8**) unutar tunela u većini serija pokazuju zavisnost o vanjskom tlaku zraka, a također i podjednaki pad tlaka s udaljenošću od ulaznih portala. Pad tlaka se može pripisati promjenama u nadmorskoj visini.



Slika 8. Izmjereni tlakovi zraka

Figure 8. Measured air pressures

4. Zaključak

U radu su analizirani podaci o kvaliteti zraka, mikroklimatskim parametrima i dobavi svježeg zraka prilikom izgradnje tunela Mala Kapela. Najviše koncentracije štetnih plinova te najdulje vrijeme potrebno za razrijeđenje ispod MDK zabilježeni su nakon miniranja. Također, pri tom radnom procesu koncentracije svih mjenjenih plinova prelaze MDK vrijednosti.

Koncentracija ugljičnog monoksida pri svim radnim procesima prelazi MDK vrijednost te pokazuje najveću učestalost prekoračenja MDK, do 100% pri miniranju, i najdulje vrijeme razrijeđenja do 40 min. Koncentracija ugljičnog dioksida prelazi MDK samo pri miniranju, i to u 7,7% slučajeva te ima vrlo kratko vrijeme razrijeđenja od 2,9 min. Dušikov monoksid prelazi MDK pri bušenju i miniranju, s time da je pri miniranju učestalost znatno veća (46,2%), dok je

vrijeme razrijeđenja veće pri bušenju minskih bušotina (39,9 min). Dušikov dioksid prelazi MDK pri svim radnim procesima, najviše pri miniranju (46,2 % slučajeva), uz prosječno vrijeme razrijeđenja do 13,5 min.

Utvrđen je pad dobave svježeg zraka od 0,3 - 1,2 m³/s na 100 m duljine ventilacijskih cijevi, što je uzrokovano povećanjem otpora strujanju te gubicima zraka.

U skladu s time uočljiv je i porast vršnih koncentracija te vremena potrebnog za smanjenje koncentracije štetnih plinova emitiranih prilikom miniranja i bušenja minskih bušotina. Suprotno tome, koncentracije i vremena razrijeđenja plinova pri utovaru i izvozu pokazuju trend pada s napretkom čela tunela. Ovo se može pripisati produljenju trajanja ciklusa izvoza zbog čega se manji broj kamiona nalazi istovremeno u blizini radnog čela, obzirom da kamioni prilikom čekanja na utovar nisu gasili pogonske motore.

Temperature unutar tunela pokazuju sezonski karakter, tj. najviše zavise o godišnjem dobu, gdje radom ventilacije dolazi do promjene temperatura dobavom vanjskog zraka prema radnim čelima tunela.

Relativna vlažnost zraka ne pokazuje zavisnost o udaljenosti od ulaznih portala niti o godišnjem dobu, poput temperature. Promjena vlažnosti zraka unutar tunela ne slijedi promjenu vlažnosti vanjskoga zraka, stoga dobava svježeg vanjskog zraka ventilacijskim sustavom ima neznatan utjecaj na relativnu vlažnost unutar tunela. Vlažnost zraka unutar tunela znatno manje varira u odnosu na vanjsku te je u prosjeku 11,8 % viša.

Tlak zraka pokazuje veliku zavisnost o vanjskom atmosferskom tlaku i promjeni nadmorske visine. Računski pad tlaka i pad tlaka dobiven korelacijom mjerenih podataka pokazuju dobro slaganje, odnosno sličnu promjenu tlaka s udaljenošću od portala, kako se mijenja niveleta tunela.

5. Literatura

- Janković, B., Vrkljan, D. (2003): Izvješća o ispitivanju kakvoće zraka i mikroklimatskih uvjeta u radnom prostoru radilišta tunela Mala Kapela. Laboratorij za ventilaciju, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. Neobjavljeno.
- Jovičić, V., Miljković, M., Nuić, J., Uljić, H., Vukić, M. (1987): Sigurnost i tehnička zaštita u rudarstvu. Univerzal, 454 pp, Tuzla.
- Mustapić, I. (2012): Građenje cestovnih tunela s osvrtom na posebnosti pri izgradnji tunela Šubir na autocesti A1. Građenje prometne infrastrukture, 479-512, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Nadilo, B. (2004): Mala Kapela – Najduži tunel u Hrvatskoj. Građevinar, 56 (1), 25-32, Zagreb.
- NGK (2014): Exhaust and harmful emissions. NGK Apark Plug Europe GmbH, Ratingen. <http://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/basic-exhaust-principles/exhaust-and-harmful-emissions>
- NIOSH (2007). Niosh pocket guide to chemical hazards. NIOSH Publications, Cincinnati, Ohio. No. 2005-149.
- Narodne novine br. 92/93. Pravilnik o maksimalno dopustivim koncentracijama štetnih tvari u atmosferi radnih prostorija i prostora i o biološkim graničnim vrijednostima. Narodne novine d.d., Zagreb.
- Narodne novine br. 13/09. Pravilnik o graničnim vrijednostima izloženosti opasnim tvarima pri radu i o biološkim graničnim vrijednostima. Narodne novine d.d., Zagreb.
- Službeni list br. 24/91. Pravilnik o tehničkim normativima za strojeve s dizelskim motorima koji se upotrebljavaju pri podzemnim rudarskim radovima u nemetanskim jamama. Službeni list SFRJ. Beograd.
- Teply, E. (1990): Rudnička ventilacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 356 pp., Zagreb.

AIR QUALITY AND MICROCLIMATIC PARAMETERS DURING EXCAVATION OF THE MALA KAPELA TUNNEL

Extended English abstract: During excavation of the Mala Kapela tunnel, measurements of harmful gases concentration, ventilation parameters and microclimatic parameters were performed. Measurements were done in 17 occasions during period of 16 months, along the advance of the tunnel excavation. Consequently, large amount of data was obtained, in different tunnel chainages, ventilation ducts length, and in different work operations during the excavation.

Main sources of harmful gases during tunnel excavation are explosives and diesel equipment. The concentration of the same mainly depends on explosive charge and overall diesel equipment power, present at the excavation face of the tunnel. Continuous measurements of the concentration of carbon monoxide (CO) and dioxide (CO₂), and nitrogen oxide (NO) and dioxide (NO₂) was performed during drilling, blasting, and loading and haulage operations. Measurements were done in 45 cases in total. Recorded data was analysed, where peak concentrations were joined to corresponding operation and the tunnel chainage. Regulations on threshold limit values were used to determine if concentrations rise above the permissible ones. In case they do, the time required for dilution of gases below permissible concentration was noted. Typically, concentrations of all measured gases rise rapidly after blasting. Afterwards, ventilation system acts to dilute them and maintain them relatively constant until the end of loading and haulage. According to measurements in this research, highest concentrations and longest time of dilution were found after blasting. At the same time, concentration of all measured gases exceeds permissible values. Carbon monoxide is found to exceed permissible values during all work operations. It shows most frequent transgression above the limit (in 33 to 100% of cases) and highest time of dilution (up to 40 min).

Air supply to the excavation face was measured in 25 cases. It was correlated to the length of ventilation ducts, as the tunnel excavation advances. Results show the trend of air flow drop of 0,3 to 1,2 m³/s per 100m of duct length, with average value of 0,7 m³/s. In accordance with air flow drop, higher peak concentrations and longer time of dilution was observed for drilling and blasting operations. Conversely, lower concentrations and shorter time of dilution were found for loading and haulage operation. This could be attributed to longer truck cycle as excavation advances, thus less diesel units are present in proximity of the excavation face.

Measured data on microclimatic parameters was correlated to season changes, distance from tunnel entrance and mutually. Air temperature was measured in 8 cases, along the tunnel and outside in the proximity of the entrance. Recorded data shows that temperature is constant along the tunnel. That is, there is no change with depth of the tunnel below surface, which is up to 433m. It was found that temperature mainly depends upon season and upon outer air that is supplied by ventilation to the tunnel. Highest temperature was recorded during summer (20 to 27 °C), when inner and outer temperature are in approximate equilibrium. Lowest inner temperature was recorded during winter (12 to 17 °C), when difference from outer temperature rises.

Relative humidity was measured in 14 cases. Recorded data shows random character, so no relations were derived, except that inner air is more humid on average and it's humidity varies much less compared to the outer air. Outer humidity ranges between 36 and 99%. Inner humidity ranges between 53,6 and 99,3 %, and it was 11,8% higher on average. Air pressure was measured in 15 cases. It was found that it corresponds to the outer atmospheric pressure. There is normal pressure drop with distance from tunnel entrance, as vertical alignment of the tunnel changes it's altitude.