

# Koncentracije štetnih plinova pri iskopu tunela miniranjem

---

**Lončarić, Miroslav**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:673945>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**KONCENTRACIJE ŠTETNIH PLINOVA PRI ISKOPU TUNELA MINIRANJEM**

Diplomski rad

Miroslav Lončarić

R - 120

Zagreb, 2017.

## KONCENTRACIJE ŠTETNIH PLINOVA PRI ISKOPU TUNELA MINIRANJEM

Miroslav Lončarić

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

### Sažetak

Iz 28 izvještaja o ispitivanju kakvoće zraka i mikroklimatskih uvjeta u radnom prostoru radilišta 11 tunela, uzeti su podaci o koncentracijama štetnih i opasnih plinova, o količinama eksploziva, protoku zraka na izlazu iz ventilacijske cijevi i udaljenosti izlaza ventilacijske cijevi od čela tunela. Tuneli su izrađeni tehnologijom bušenja i miniranja. Nakon izvedenih miniranja mjerene su koncentracije štetnih plinova na radilištu tunela. Provedena je analiza utjecaja količine eksploziva, protoka zraka i udaljenosti ventilacijske cijevi od čela na ukupnu koncentraciju štetnih plinova i vrijeme razrjeđenja.

Ključne riječi: miniranje, vjetrenje tunela, koncentracije štetnih plinova, vrijeme razrjeđenja

Završni rad sadrži: 52 stranice, 5 tablica, 40 slika i 16 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF  
Dr. sc. Darko Vrkljan, redoviti profesor RGNF  
Dr. sc. Trpimir Kujundžić, redoviti profesor RGNF

CONCENTRATION OF HARMFUL GASES DURING EXCAVATION OF TUNELS USING BLASTING  
TECHNIQUE

Miroslav Lončarić

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

Data from 28 reports on air quality and microclimate in workplace of 11 tunels was analysed in this work. This includes concentration of gases, the amount of explosive, air flow from the ventilation duct, and distance of the ventilation duct from the tunnel excavation face. Tunels are made by “drill and blast” technique. Blasting was observed as a source of harmful gasses in tunnels workplace. Analysis of influence of the amount of explosive, air flow and distance of ventilation duct from the tunnel excavation face on total concentration of harmful gasses and dilution time was conducted.

Keywords: blasting, tunnel ventilation, concentration of harmful gasses, dilution time

Thesis contains: 52 pages, 5 tables, 40 figures and 16 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Mario Klanfar, Assistant Professor

Reviewers: PhD Mario Klanfar, Assistant Professor  
PhD Darko Vrkljan, Full Professor  
PhD Trpimir Kujundžić, Full Professor

## SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	TEHNOLOGIJA ISKOPA TUNELA .....	2
2.1.	Iskop tunela primjenom NATM .....	7
2.2.	Primarna podgrada tunela .....	8
2.2.1.	Sidra.....	8
2.2.2.	Mlazni beton .....	11
2.3.	Utovar i odvoz odminirane mase .....	11
3.	VJETRENJE TUNELA .....	13
3.1.	Separatno vjetrenje .....	13
3.2.	Ventilatori .....	15
3.2.1.	Zakoni rada ventilatora .....	15
3.2.2.	Podjela ventilatora .....	16
4.	ŠTETNI PLINOVİ KAO PRODUKTI RADOVA NA PROBIJANJU TUNELA .	18
4.1.	Kisik O <sub>2</sub> .....	18
4.2.	Ugljični monoksid CO .....	19
4.3.	Ugljični dioksid CO <sub>2</sub> .....	19
4.4.	Dušikov monoksid NO .....	20
4.5.	Dušikov dioksid NO <sub>2</sub> .....	20
4.6.	Sumporov dioksid SO <sub>2</sub> .....	20
4.7.	Metan CH <sub>4</sub> .....	20
4.8.	Acetaldehid .....	21
5.	MJERENJA PRI MINIRANJIMA .....	22
5.1.	Aktivan način mjerenja koncentracija plinovitih onečišćujućih tvari uređajem Multiwarn II.....	23
5.1.1.	Elektrokemijski senzor .....	23
5.1.2.	Katalitički senzor .....	24
5.1.3.	Infracrveni senzor .....	25
5.2.	Krilni anemometar .....	26
5.3.	Mjerenje ventilacijskih parametara.....	26
5.4.	Parametri s najvećim utjecajem na koncentracije štetnih plinova.....	27
6.	OBRADA PODATAKA .....	32
6.1.	Analiza kretanja koncentracija štetnih plinova na radilištu tunela .....	32

6.2.	Sastav plinova miniranja.....	35
6.3.	Primjer obrade podataka i očekivani rezultati .....	35
6.3.1.	Očekivani utjecaj eksploziva na promjenjive varijable .....	38
6.3.2.	Očekivani utjecaj udaljenosti ventilacijske cijevi na promjenjive varijable.....	38
6.3.3.	Očekivani utjecaj protoka zraka na promjenjive varijable .....	39
6.4.	Rezultati .....	40
6.4.1.	Eksploziv kao čimbenik u koncentraciji plinova.....	42
6.4.2.	Udaljenost cijevi kao čimbenik u koncentraciji plinova.....	45
6.4.3.	Protok zraka kao čimbenik u koncentraciji plinova.....	46
7.	ZAKLJUČAK.....	50
8.	LITERATURA .....	51

## POPIS SLIKA

<b>Slika 2-1.</b> Tunel „Brezik“ .....	4
<b>Slika 2-2.</b> Tunel „Brinje“ .....	4
<b>Slika 2-3.</b> Tunel „Plasina“ .....	5
<b>Slika 2-4.</b> Tunel „Škurinje II“ .....	5
<b>Slika 2-5.</b> Tunel „Tuhobić“ .....	6
<b>Slika 2-6.</b> Tunel „Sleme“, desna cijev .....	6
<b>Slika 2-7.</b> Injektirano sidro.....	8
<b>Slika 2-8.</b> Sidro vezano plastičnom masom .....	9
<b>Slika 2-9.</b> Sidro s mehaničkom bravom .....	9
<b>Slika 2-10.</b> Sidro u obliku razrezane cijevi .....	10
<b>Slika 2-11.</b> Swellex sidro .....	10
<b>Slika 2-12.</b> Samobušeće sidro .....	11
<b>Slika 3-1.</b> Tlačno vjetrenje tunela .....	13
<b>Slika 3-2.</b> Sisajuće vjetrenje .....	14
<b>Slika 3-3.</b> Kombinirano vjetrenje .....	14
<b>Slika 3-4.</b> a) sisajuće; b) tlačno .....	14
<b>Slika 3-5.</b> Radijalni ventilator .....	16
<b>Slika 3-6.</b> Aksijalni ventilator .....	17
<b>Slika 5-1.</b> Dijelovi uređaja Multiwarn II .....	22
<b>Slika 5-2.</b> Detaljniji prikaza dijelova uređaja Multiwarn II .....	23
<b>Slika 5-3.</b> Elektrokemijski senzor .....	24
<b>Slika 5-4.</b> Jedan pellistor katalitičkog senzora .....	25
<b>Slika 5-5.</b> Infracrveni senzor .....	25
<b>Slika 5-6.</b> Digitalni krilni anemometar DA4000.....	26
<b>Slika 5-7.</b> Pitot-Pradtlova cijev .....	27
<b>Slika 5-8.</b> Skica situacije prilikom mjerenja .....	29
<b>Slika 6-1.</b> Vremenski dijagram koncentracije plinova.....	34
<b>Slika 6-2.</b> Vremenski dijagram razrjeđenja svih plinova.....	37
<b>Slika 6-3.</b> Zavisnost koncentracije štetnih plinova o količini eksploziva .....	38
<b>Slika 6-4.</b> Produljenje vremena razrjeđenja .....	39
<b>Slika 6-5.</b> Skraćenje vremena razrjeđenja .....	39
<b>Slika 6-6.</b> Dijagram ekvivalentna koncentracija – količina eksploziva .....	43
<b>Slika 6-7.</b> Dijagram vršna koncentracija – količina eksploziva.....	44

<b>Slika 6-8.</b> Dijagram vrijeme razrjeđenja – količina eksploziva .....	44
<b>Slika 6-9.</b> Dijagram ekvivalentna koncentracija – udaljenost ispusta cijevi.....	45
<b>Slika 6-10.</b> Dijagram vršna koncentracija – udaljenost ispusta cijevi .....	46
<b>Slika 6-11.</b> Dijagram vrijeme razrjeđenja – udaljenost ispusta cijevi.....	46
<b>Slika 6-12.</b> Dijagram ekvivalentna koncentracija – protok.....	47
<b>Slika 6-13.</b> Dijagram ekvivalentna koncentracija – protok.....	48
<b>Slika 6-14.</b> Dijagram vrijeme razrjeđenja – protok.....	49



## **POPIS TABLICA**

<b>Tablica 2-1.</b> Strojevi korišteni pri iskopu .....	12
<b>Tablica 5-1.</b> Podaci o udaljenosti cijevi, protoku i eksplozivu.....	30
<b>Tablica 6-1.</b> Ovisnost ekvivalentne koncentracije o nepromjenjivim varijablama .....	40
<b>Tablica 6-2.</b> Ovisnost vršne koncentracije o nepromjenjivim varijablama .....	41
<b>Tablica 6-3.</b> Ovisnost vremena razrjeđenja o nepromjenjivim varijablama.....	41

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>MDK</i>	ppm	maksimalno dopuštena koncentracija
<i>KDK</i>	ppm	kratkotrajno dopuštena koncentracija
$\lambda$		koeficijent trenja vjetrenog provodnika
<i>dx</i>	m	duljina zrakovoda
<i>D</i>	m	promjer cijevi
<i>v</i>	m/s	brzina zraka
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća zraka
<i>P</i>	kW	snaga ventilatora
<i>P<sub>ef</sub></i>	kw	efektivna snaga ventilatora
<i>Q</i>	m <sup>3</sup> /s	protok
$\eta$		faktor korisnog djelovanja
<i>m<sub>e</sub></i>	kg	količina eksploziva
<i>p<sub>1</sub></i>	Pa	ukupni tlak
<i>p<sub>2</sub></i>	Pa	statički tlak
<i>Raz</i>	min	vrijeme razrjeđenja
<i>Ekv</i>	ppm*min	ekvivalentna koncentracija
<i>u</i>	m	udaljenost cijevi od čela
<i>Vr</i>	ppm	vršna koncentracija
<i>L<sub>v</sub></i>	m	udaljenost cijevi od čela
<i>L<sub>i</sub></i>	m	udaljenost instrumenata od čela

## 1. UVOD

Ovaj rad bavi se praćenjem koncentracija štetnih plinova u tunelima „Brezik“, „Brinje“, „Grič“, „Plasina“, „Škurinje I“, „Škurinje II“, „Sleme“, „Trsat“, „Tuhobić“, „Veliki Gložac“ te „Mala Kapela“ prilikom izvođenja miniranja koje je uzrok većeg udjela štetnih plinova u radnom prostoru tunela, dok se od utjecaja dizel mehanizacije javljaju znatno manje količine.

U drugom poglavlju biti će opisan način izrade tunela iz kojih su uzeti podaci za potrebe ovog rada. Svi razmatrani tuneli su izrađeni Novom austrijskom tunelskom metodom (NATM) koja podrazumijeva bušenje i miniranje te nakon toga utovar i odvoz odminirane stijene. Biti će opisan i način izvođenja primarne podgrade.

Ovakva tehnologija iskopa zahtjeva primjenu vjetrenja zbog pojave štetnih plinova na čelu tunela nakon primjenjenog miniranja. Također, ventilacijski sustav mora ostati u pogonu i nakon miniranja zbog utovara i izvoza. Načini vjetrenja, njegove karakteristike te vrste i karakteristike ventilatora biti će opisane u trećem poglavlju.

Detonacijom eksploziva oslobađaju se plinovi opasni po ljudsko zdravlje: ugljični monoksid, ugljični dioksid, dušični monoksid, dušični dioksid, sumporni dioksid, metan i acetaldehid. Na koji način oni štetno djeluju na ljudski organizam već i pri malim količinama biti će obrađeno u posebnom poglavlju.

Glavni dio rada je prikaz i opis mjerenja koncentracije plinova te obrada rezultata. Prilikom analize podataka glavni predmet proučavanja je kako neki od čimbenika, a to su količina eksploziva, udaljenost ispusta ventilacijske cijevi od čela tunela i dobavna količina zraka na izlazu ventilacijske cijevi, djeluju na koncentracije štetnih plinova.

Statističkom obradom i grafičkim prikazima dobiveni su rezultati koji govore o načinu djelovanja pojedinog čimbenika na ukupnu koncentraciju štetnih plinova i vrijeme razrjeđenja te koji govore o udjelu djelovanja svakog od čimbenika na koncentraciju štetnih plinova i njihovo vrijeme razrjeđenja.

## 2. TEHNOLOGIJA ISKOPA TUNELA

Tuneli su linijske građevine koje se prostiru kroz zemljinu koru i različite geološke, geotehničke i hidrogeološke uvjete. Obzirom da u većini slučajeva geotehnički i ostali uvjeti nisu konstantni tj. nisu isti duž cijele dionice tunela, neophodna su temeljita inženjersko geološka i geotehnička istraživanja. Geotehnički uvjeti na lokaciji, osim što ovise o mehaničkim svojstvima dominantne stijene, ponajviše ovise o položajima i gustoći ravnina diskontinuiteta, ispunama diskontinuiteta, dimenzijama blokova i pojavama podzemne vode.

Kod iskopa tunela treba voditi računa da budu ekonomično i tehnički kvalitetno izvedeni, što znači da je potrebno troškove iskopa svesti na minimum i da je potrebno osigurati stabilnost nosive konstrukcije podgrade tunela.

Radovi izgradnje tunela mogu se podijeliti na slijedeće grupe:

- radovi na iskopu tunela
- radovi izrade primarne podgrade
- radovi izrade sekundarne podgrade

Radovi iskopa tunela imaju dominantnu ulogu i ekonomsku važnost prilikom izgradnje. U tu grupu radova spada i odvoz i odlaganje odminiranog stijenskog materijala te vjetrenje i prema potrebi odvodnjavanje. Za radove na probijanju koristi se građevinska mehanizacija koja mora biti primjerenih gabarita za rad u skućenom prostoru i koja je pokretana dizelskim pogonom pa je stoga potrebno primjereno vjetrenje tunela s obzirom na broj strojeva i broj ljudi koji borave u radnom prostoru.

Primarna podgrada daje tunelu konačnu stabilnost i ako je potrebno, izvodi se odmah nakon radova iskopa, ovisno o vrsti i stabilnosti stijene.

Sekundarna podgrada najčešće ima funkciju preuzimanja dijela naprezanja stijenske mase, osiguravanja ujednačene unutrašnje površine, pridržavanje hidroizolacije, mogućnost lakšeg provjetravanja, izgled, davanje tunelu aerodinamični oblik itd.

Ekonomičnost, kvaliteta, što je moguće kraći rok iskopa tunela, geološki, geotehnički, hidrogeološki uvjeti i ostala svojstva stijenske mase utječu i na odabir tehnologije iskopa. (Hudec et al, 2009; Mustapić, 2012).

Tehnologija iskopa može se podijeliti na:

-storojni iskop

## -iskop bušenjem i miniranjem

Za strojni iskop mogu se koristiti hidraulični čekići, strojevi za sukcesivni iskop tunela s longitudinalno ili transverzalno rotirajućom reznom glavom i strojevi za iskop u punom profilu („tuneleri“). Strojovima s pokretnom reznom glavom je moguće izvesti proizvoljan oblik poprečnog presjeka tunela dok „tuneler“ može izraditi kružni ili eliptični poprečni presjek. Rezni element tunelera se hidraulički potiskuje na čelo ostvarujući tako potrebnu silu za razrušavanje. Neki od navedenih strojeva mogu biti pogonjeni dizel motorima, što je bitno iz aspekta onečišćujućih plinova.

Iskop primjenom miniranja obuhvaća izradu minskih bušotina, punjenje bušotina eksplozivom i otpucavanje. Stijena se razrušava energijom eksploziva, pri čemu plinoviti produkti detonacije uvijek čine kratkotrajno ali značajno onečišćenje radne atmosfere.

Nakon što se razori stijenska masa na čelu tunela, slijedi utovar i transport razorene stijene iz tunela.

Iz razloga što se većina tunela u Hrvatskoj nalazi na području Dinarida, koje izgrađuju većinom karbonatne stijene u kojima je česta pojava kaverni, špilja, diskontinuiteta ispunjenih vodom, tj. geološki uvjeti u karbonatnom podzemlju su promjenjivi, gotovo svi tuneli na cestama i autocestama Hrvatske su iskopani metodom miniranja. Drugi razlog za iskop tunela metodom bušenja i miniranja je to što tuneli na hrvatskim cestama i autocestama nisu dovoljno dugački, pa bi uporaba tunelera bila neisplativa. (Mustapić, 2012).

Tuneli koji će se razmatrati u ovom radu, tj. čiji sastav atmosfere i koncentracije štetnih plinova će se razmatrati, su također izrađeni metodom bušenja i miniranja koja se temelji na NATM-u (Nova austrijska tunelska metoda).

Na slijedećim slikama su prikazani radovi na nekima od tunela. Na slici 2-1 prikazani su ulazi u obje cijevi tunela „Brezik“ pri kraju radova. Na slici 2-2 prikazan je početak radova na tunelu „Brinje“, tj. bušilica sa vodilicama kojima se buše bušotine za postavljanje eksploziva. Na slici 2-3 prikazan je ulaz u tunel „Plasina“ i ventilacijska cijev promjera 2 m na koju je priključen aksijalni ventilator. Na slici 2-4 prikazano je unošenje oplate za sekundarnu podgradu u tunel „Škurinje II“. Na slici 2-5 prikazana je bušilica u toku bušenja minskih bušotina u tunelu „Tuhobić“. Na slici 2-6 prikazani su radovi punjenja minskih bušotina eksplozivom na čelu tunela „Sleme“.



**Slika 2-1.** Tunel „Brezik“ (Viadukt d.d., 2003)



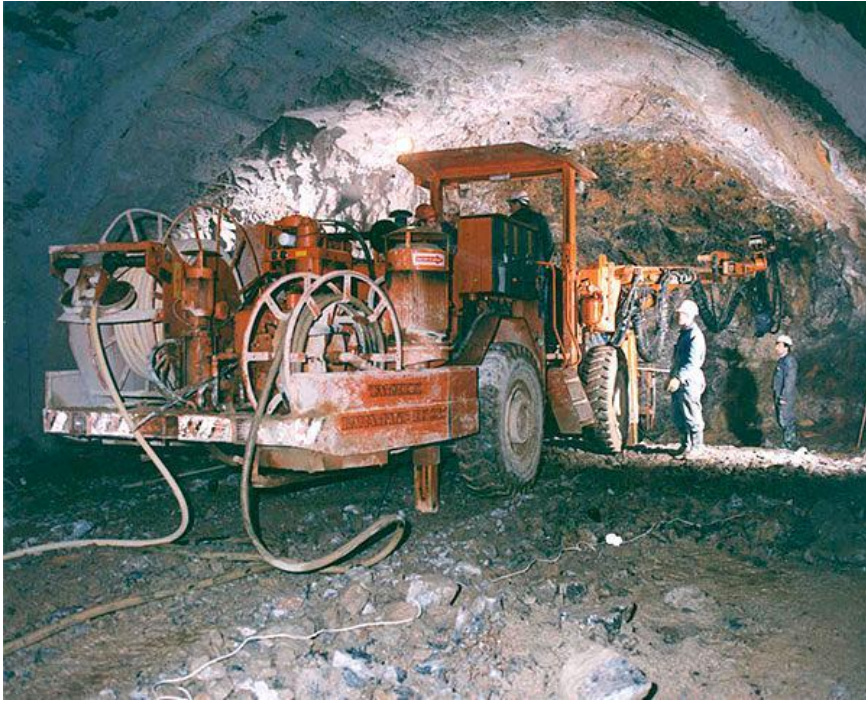
**Slika 2-2.** Tunel „Brinje“ (GI grupa d.o.o., 2002)



**Slika 2-3.** Tunel „Plasina“ (GI grupa d.o.o., 2002)



**Slika 2-4.** Tunel „Škurinje II“ (Viadukt d.d., 2008)



**Slika 2-5.** Tunel „Tuhobić“ (Viadukt d.d., 1996)



**Slika 2-6.** Tunel „Sleme“, desna cijev (Viadukt d.d., 2006)



## 2.1. Iskop tunela primjenom NATM

Primjena NATM (Nova austrijska tunelska metoda) u tunelogradnji zapravo podrazumijeva iskop tunela bušenjem i miniranjem pri čemu se vrši miniranje čela tunela u punom profilu ukoliko je riječ o prvoj i drugoj kategoriji stijenske mase prema kategorizaciji po Bieniawskom, a koja je primjenjivana na navedenim tunelima. Prema NATM, okolna stijena se promatra kao nosivi dio podgrade a ne samo kao opterećenje. Tijekom iskopa mjere se reakcije okolne stijene, koje se mogu odraziti u obliku deformacija i tlakova podgrade. Podgrađivanje se kod nove austrijske tunelske metode vrši primjenom mlaznog betona i stijenskih sidara, ovisno o kategoriji iskopa i armaturnih mreža. Čelični lukovi se primjenjuju kao privremena podgrada dok mlazni beton ne očvrstne kako bi osigurao ispravnu geometriju tunela. Tuneli u čvrstim stijenama su potkovičastog oblika i poprečnog presjeka od 90 m<sup>2</sup> do 150 m<sup>2</sup>. Primarna podgrada se sastoji od armiranog mlaznog betona, stijenskih sidara i čeličnih lukova koji se ugrađuju po potrebi. Na tunelima koji su razmatrani ovim radom koristili su se trodjelni lukovi potkovičastog poprečnog presjeka. Kako bi se osigurala vodonepropusnost ugrađuje se podloga od mlaznog betona, podložni sloj od geotekstila i vodonepropusne membrane debljine 2 mm. Na kraju se ugrađuje sekundarna obloga od nearmiranog betona debljine 250 mm (Hudec et al, 2009).

Iskop tunela bušenjem i miniranjem provodi se u ciklusima. Jedan ciklus se sastoji od slijedećih radova (Mustapić, 2012):

- dopreme bušaće opreme na čelo radilišta
- obilježavanja minskog polja
- bušnje mina
- punjenja bušotina eksplozivom
- povezivanja minskog polja i kontrole minskog polja
- otpucavanja eksploziva u minskim bušotinama
- provjetravanja
- pregleda obavljenog miniranja uz otklanjanje nestabilnih dijelova stijene u konturi iskopa
- utovar i odvoz odminiranog stijenskog materijala
- ugrađivanja podgrade

Nakon miniranja potrebno je čekati da se razine štetnih plinova spuste ispod razine propisane pravilnicima. Kontrola obavljenog miniranja se izvodi zbog provjere ima li neaktiviranih mina koje, ako postoje se uništavaju.

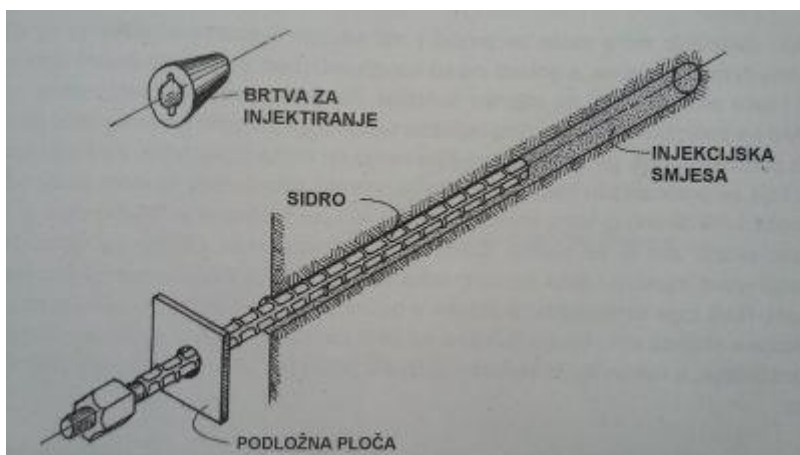
## 2.2. Primarna podgrada tunela

U okviru nove austrijske tunelske metode glavni elementi koji se primjenjuju za primarnu podgradu su čelična sidra i mlazni beton. Oni zajedno tvore cjelinu koja ne dozvoljava popuštanje stijene. Raspored i gustoća sidara te debljina mlaznog betona utvrđuju se na temelju podataka o ravninama diskontinuiteta, njihovoj orijentaciji, dimenzijama blokova, ispunama diskontinuiteta i pojavama podzemne vode (Hudec et al, 2009).

### 2.2.1. Sidra

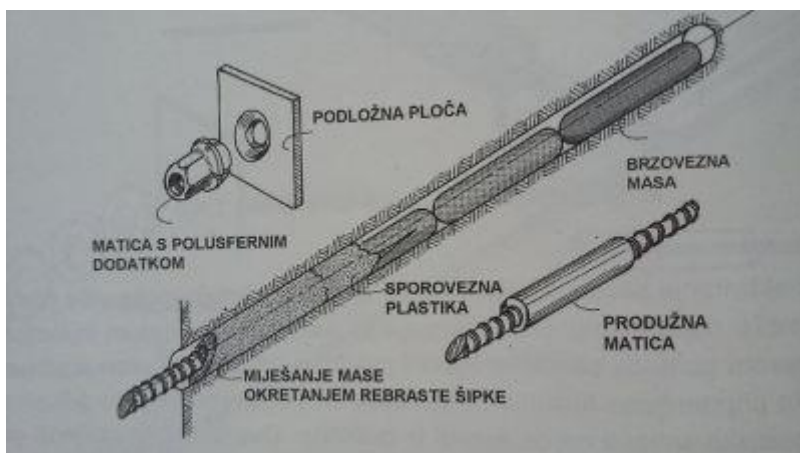
Danas postoji mnogo vrsta sidara, a neka od njih su: injektirano sidro, sidro vezano plastičnom masom, sidro s mehaničkom bravom, sidro u obliku razrezane cijevi, Swellex sidro, samobušćeće sidro.

Za injektirano sidro je potrebno bušotinu prije postavljanja sidra ispuniti gustom injekcijskom cementnom smjesom i zašiljeno sidro utisnuti pneumatskim čekićem. Sidro neće biti potpuno nosivo sve dok cement u injekcijskoj smjesi ne veže. Takvo sidro je prikazano na slici 2-7.



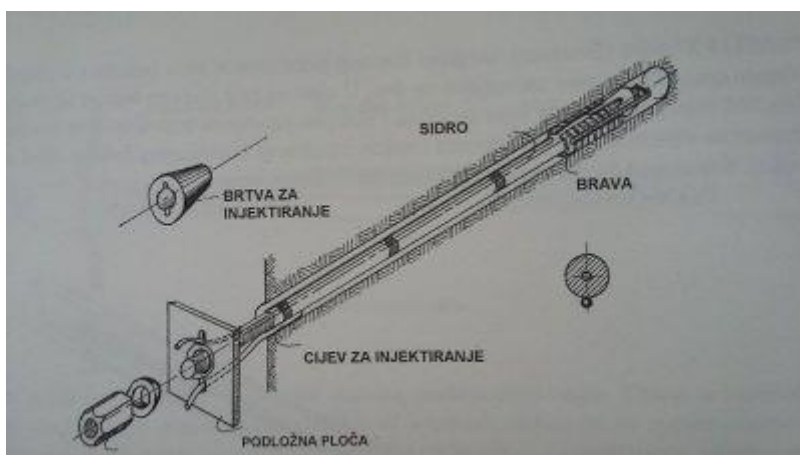
Slika 2-7. Injektirano sidro (Hudec et al, 2009)

Kod sidara vezanih plastičnom masom, zbog bržeg vezivanja, nosivost se postiže puno brže. Takvo sidro je prikazano na slici 2-8.



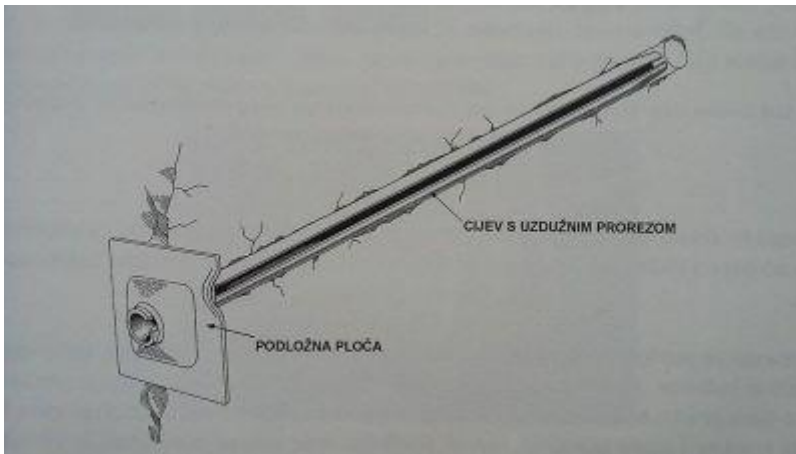
**Slika 2-8.** Sidro vezano plastičnom masom (Hudec et al, 2009)

Sa sidrima s mehaničkim bravama moguće je postići trenutno djelovanje. Princip djelovanja je takav da se okretanjem sidra brava na kraju sidra širi i tako odupire u stijenu. Tijelo sidra se obično štiti od erozije injektiranjem cementne smjese. Sidro s mehaničkom bravom prikazano je na slici 2-9.



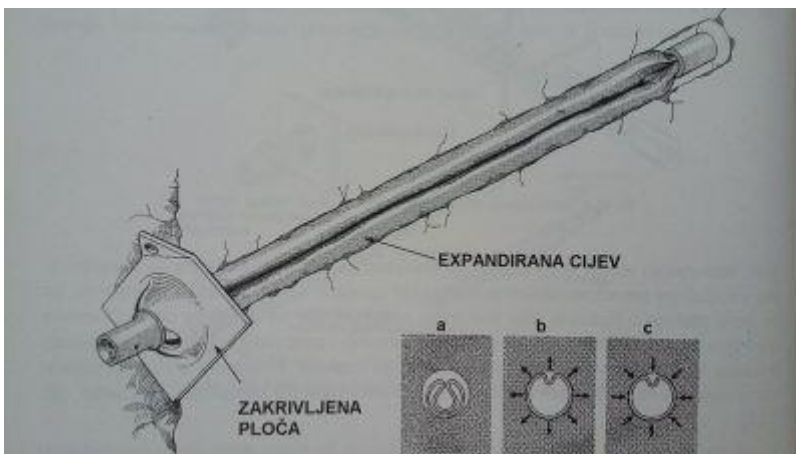
**Slika 2-9.** Sidro s mehaničkom bravom (Hudec et al, 2009)

Sidro u obliku razrezane cijevi, prikazano na slici 2-10., djeluje tako da se radijalno širi i na stijenke bušotine djeluje trenjem.



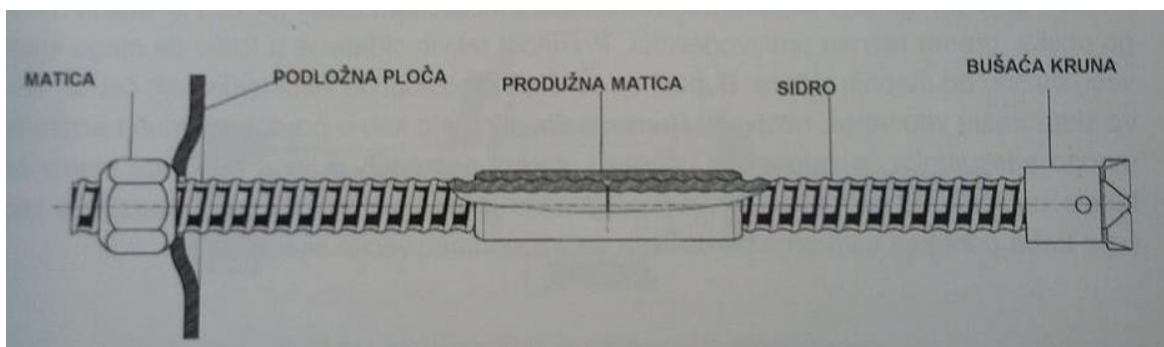
**Slika 2-10.** Sidro u obliku razrezane cijevi (Hudec et al, 2009)

SWELLEX sidra su građena u obliku cijevi presavijene u porečnom smjeru. Cijev je začepljena na dnu . Sidro djeluje na stijenkbu bušotine kad se u njega utisne voda pod velikim tlakom. Sidro i način djelovanja prikazano je na slici 2-11.



**Slika 2-11.** Swellex sidro(Hudec et al, 2009)

Samobušecim sidrom se može uštedjeti na vremenu prilikom sidrenja jer je bušača šipka u stvari sidro koje se ne vadi nakon bušnja. Kroz cijevasto sidro se utiskuje voda koja tijekom bušenja iznosi nabušene čestice. Nakon završetka bušenja kroz sidro se utiskuje smjesa koja cementira sidro (Hudec at al, 2009). Na slici 2-12 prikazano je samobušee sidro.



**Slika 2-12.** Samobušeače sidro (Hudec et al, 2009)

### 2.2.2. Mlazni beton

Mlazni beton se na stijenu nabacuje iz mlaznica pomoću komprimiranog zraka. Postoje dva načina nabacivanja: suhi i mokri.

Kod suhog se voda i ubrzivač vezivanja dodaju tek prije izlaska iz mlaznice. Generalno su strojevi za suho nabacivanje betona građeni na slijedeći način: u lijevak stroja se ubacuje suha smjesa ispod kojeg se nalazi bubanj s odjeljcima. Cijev komprimiranog zraka istjeruje smjesu upravo iz tog bubnja iz svakog odjeljka pojedinačno. Suha smjesa putuje kroz cijev i kad dođe blizu izlaza iz mlaznice, dodaju joj se voda i ubrzivač vezivanja. Takva gotova smjesa se lijepi za stijenu velikom brzinom.

Bolje i efikasnije je mokro nabacivanje betona, posebno kod većih tunela. U stroj za nabacivanje je potrebno dovesti gotovu smjesu betona. Takvi strojevi imaju dva rotora. Jedan pomoću krila utiskuje gotovu smjesu u elastičnu cijev, a drugi pritišće takvu elastičnu cijev i tjera smjesu kroz nju. Cijev je opterećena i podtlakom, tako da i sama usisava smjesu. Mlaznicom se manipulira strojno. Mlaznica je ugrađena na ruci, a ruka je instalirana na vozilu za nabacivanje. Takvo strojno manipuliranje sa daljine je efikasnije i sigurnije (Hudec et al, 2009).

### 2.3. Utovar i odvoz odminirane mase

U tunelima na hrvatskim autocestama za utovar su upotrebljavani utovarači a za transport damperi i kamioni istresači. Utovarači, damperi i kamioni istresači su slobodna autonomna transportna sredstva s dizel pogonom. U tablici 2-1 navedeni su utovarivači, kamioni i damperi koji su korišteni za iskop tunela razmatranih u ovom radu.

**Tablica 2-1.** Strojevi korišteni pri iskopu

<b>Tunel</b>	<b>Utovarni strojevi</b>	<b>Transportni strojevi</b>
Brezik	Fiat Hitachi 270.3; CAT 966 G2	Kamioni: Volvo 25AC (187 kW; 3 komada)
Brinje	CAT 966 IIG (193 kW)	Damperi: Kiruna (211 kW); GHH 5 (206 kW); GHH 30.1 (204 kW; 4 komada)
Grič	CAT 966	Damperi: Kiruna K250-21CAT (242 kW; 3 komada)
Plasina	Fiat Cobelco W 270	Kamioni: Mercedes 2628, CAT 300 B (2 komada); Tatra (2 komada)
Škurinje I	Caterpillar 966H	Damper Volvo A 30 E
Škurinje II	CAT 966 G2 (193 kW)	Kamioni: MAN (294 kW; 2 komada)
Sleme	CAT 966G (192 kW)	Kamioni: MAN (277,4 kW; 3 komada)
Trsat	Ö&K L45.5	Kamion Tatra (270 kW); damper Fiat Hitachi (250 kW)
Tuhobić	NEW HOLLAND (202 kW)	Kamioni: Volvo (177 kW; 3 komada); Tatra (148 kW; 2 komada)
Veliki Gložac	CAT 966G (192 kW)	Damperi Volvo A25C (190 kW; 3 komada)
Mala Kapela	Fiat-Hitachi 220.2; O&K L45 (260 kW)	Kamioni: Mercedes 2628 (3 komada), Mercedes 2635, Mercedes 2626, Mercedes 2632

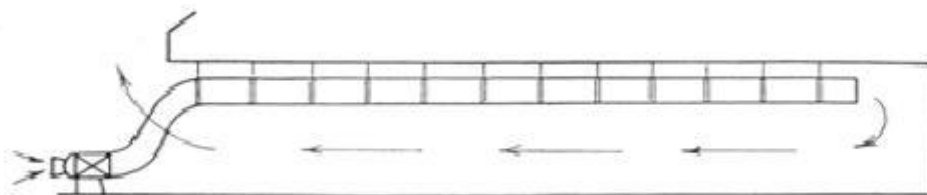
### 3. VJETRENJE TUNELA

U procesu iskopa tunela, vjetrenje ima zadatak da razrijedi koncentraciju opasnih i štetnih plinova u atmosferi tunela ispod MDK (maksimalno dopuštene koncentracije) i KDK (kratkotrajno dopuštene koncentracije). Razrijeđenje koncentracije opasnih i štetnih plinova je potrebno kako bi se osigurao siguran boravak ljudi nakon obavljenog miniranja te tijekom utovara i odvoza odminiranog materijala. U rudarskoj praksi se rudnike i podzemne prostorije nastoji vjetriti prirodno. Uvjet za takav način je postojanje dva ulaza i razlika među tlakovima na ta dva ulaza. Ako za prirodno vjetrenje ne postoje uvjeti ili ako je pre slabo, primjenjuje se umjetno vjetrenje. Vjetrenje još možemo podijeliti na neposredno vjetrenje, separatno i difuzno. Neposredno podrazumijeva vjetrenje prolaznom zračnom strujom. Difuzno je dozvoljeno u prostorijama i hodnicima koji su na maloj udaljenosti od svježeg zračnog struje. Kod separatnog ili neprotočnog vjetrenja se koriste cijevi i ventilatori. U rudnicima se koristi za vjetrenje slijepih radilišta pa se stoga koristi i kod vjetrenja tunela jer su i tuneli slijepa radilišta sa većim poprečnim presjekom od rudinčkih hodnika.

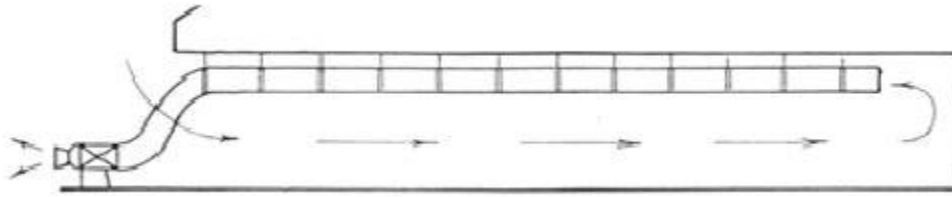
#### 3.1. Separatno vjetrenje

Postoje tri načina separatnog vjetrenja tunela tijekom iskopa (Vrkljan, 2007):

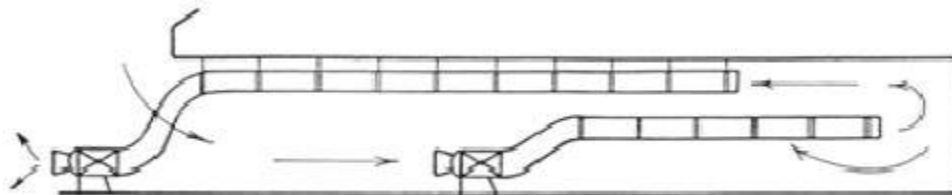
- tlačno vjetrenje - pomoću vjetrenog provodnika tlačno se dovodi svjež zrak na čelo tunela, onečišćena zračna struja vraća se po profilu tunela (Slika 3-1.),
- sisajuće vjetrenje - pomoću vjetrenog provodnika sisajući se odvodi onečišćena zračna struja, svjež zračna struja dovodi se na čelo tunela po profilu tunela (Slika 3-2.),
- kombinirano vjetrenje (tlačno – usisno) - izvodi se kombinacijom dvaju vjetrenih provodnika, kapacitet usisnog ventilatora dimenzionira se nešto veći u odnosu na tlačni (Slika 3-3.).



**Slika 3-1.** Tlačno vjetrenje tunela (Vrkljan, 2007).

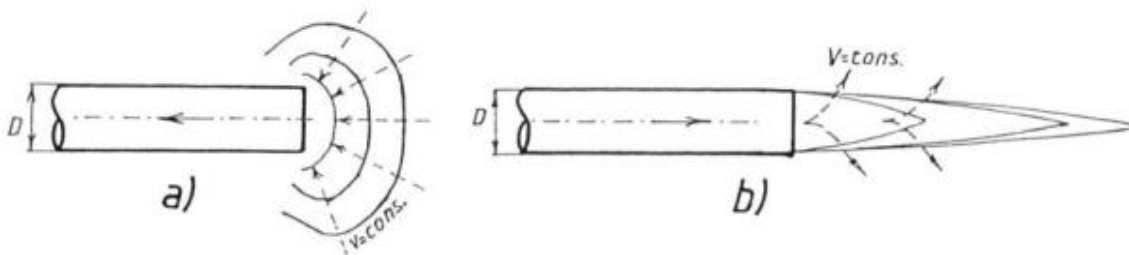


Slika 3-2. Sisajuće vjetrenje (Vrkljan, 2007).



Slika 3-3. Kombinirano vjetrenje (Vrkljan, 2007).

Kod tlačnog isisajućeg vjetrenja postoje određene nedostaci. Nedostatak tlačnog vjetrenja jest porovraćanje zračne struje onečišćene opasnim i štetnim plinovima po profil tunela, a nedostatak isisajućeg jest poroulaženje sveže žeg zraka. Najbolje je primjeniti kombinaciju tlačnog isisajućeg i setakotklanja u nedostaci. Na slici 3-4 prikazane su izolirane brzine strujanja zraka kod isisajućeg i tlačnog vjetrenja.



Slika 3-4. a) isisajuće; b) tlačno (Vrkljan, 2007)

U svim tunelima koji su razmatrani ovim radom, primjenjeno je separatno tlačno vjetrenje.

Duž cjevovoda za dovod svježeg zraka na čelo ili odvod onečišćenog sa čela javljaju se određeni gubici na spojevima i na oštećenim dijelovima cijevi i dolazi do pada tlaka koji se računa prema Darcy – weisbachovoj jednadžbi:



$$dp = \lambda \cdot \frac{dx}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho, \text{ Pa} \quad (3-1)$$

gdje je:

$\lambda$  – koeficijent trenja vjetrenog provodnika,

$dx$  – duljina zrakovoda m,

$D$  – promjer cijevi m,

$v$  – brzina zraka m/s,

$\rho$  – gustoća zraka kg/m<sup>3</sup> (Vujević, 2012).

## 3.2. Ventilatori

### 3.2.1. Zakoni rada ventilatora

Zakon proporcionalnosti koji vrijedi za ventilatore u odnosu na broj obrtaja „n“ po sljedećim osnovama (Teplý, 1990):

- količina je proporcionalna prvoj potenciji:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

- tlak je proporcionalan drugoj potenciji:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

- snaga je proporcionalna trećoj potenciji:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}$$

Gustoća zraka nema utjecaja na količinu, a prema tlaku i snazi se odnosi linearno proporcionalno (Teplý, 1990):

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

Efektivna snaga ventilatora (Teplý, 1990):

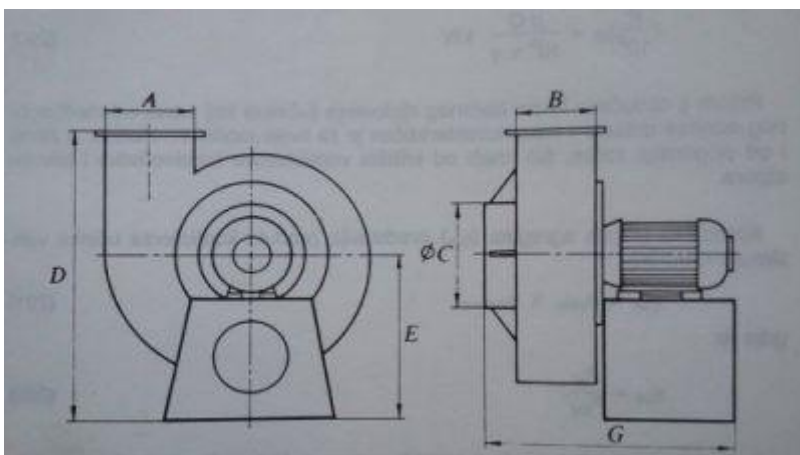
$$P_{ef} = \frac{p \cdot Q}{10^3 \cdot \eta} \text{ kW}$$

(3-2)

- $\eta$  – faktor korisnog djelovanja ovisan o međusobnom odnosu dobave i tlaka, karakterističan za svaki model ventilatora

### 3.2.2. Podjela ventilatora

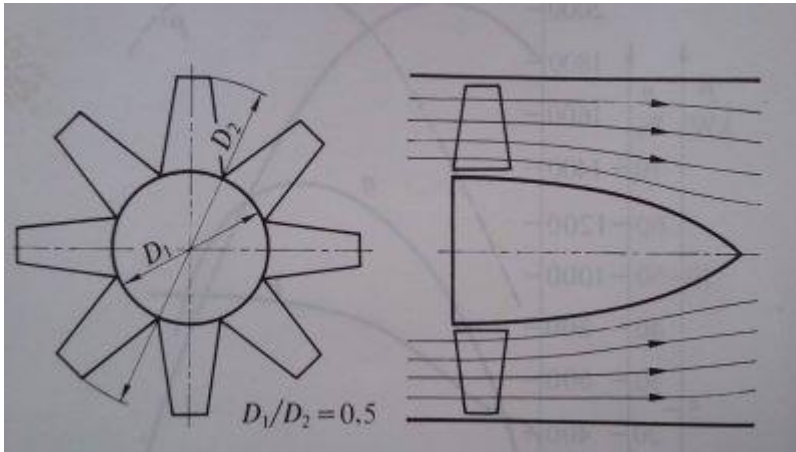
S obzirom na konstrukciju ventilatori se dijele na radijalne i aksijalne. Radijalni ventilator se sastoji od pužnog kućišta u kojem se nalazi kotač s lopaticama. Zrak ulazi aksijalno u kućište a izlazi u tangencijalnom smjeru. Ventilator se pokreće direktno pomoću elektromotora ili elektromotorom preko zupčastog remena. Na slici 3-5 prikazana je konstrukcija radijalnog ventilatora.



Slika 3-5. Radijalni ventilator (Teply, 1990)

Proizvedeni tlak ovisi o nagibu lopatica, smjeru nagiba lopatica i o odnosu unutarnjeg i vanjskog promjera lopatica.

Shema aksijalnog ventilatora prikazana je na slici 3-6 Glavni dio aksijalnog ventilatora je vodeći kotač na kojem se nalazi 5 do 10 lopatica. Zrak u takav ventilator ulazi aksijalno i izlazi također aksijalno u istom smjeru. Kod aksijalnih ventilatora je prednost što su pogodni za ugradbu u cijevi i što mogu promjeniti smjer okretanja a time i strujanja. Pogodni su i za visoke tlakove. U tenelima koji su razmatrani ovim radom korišteni su upravo aksijalni ventilatori.



Slika 3-6. Aksijalni ventilator (Teply, 1990)

#### 4. ŠTETNI PLINOVI KAO PRODUKTI RADOVA NA PROBIJANJU TUNELA

Gospodarski eksplozivni koji se koriste kod miniranja prilikom iskopa tunela su smjese oksidansa i organskih gorivih tvari koje se sastoje od ugljika, vodika, dušika i kisika, pa su i plinoviti produkti eksplozije sastavljeni od tih elemenata (Vukić, 1978).

U procesu eksplozije bitnu ulogu ima bilanca kisika korištenog eksploziva. Bilanca kisika je odnos količine kisika koju sadrži eksploziv i količine kisika koja je potrebna za oksidaciju svih gorivih tvari u sastavu eksploziva. Ukoliko se kisik nakon eksplozije ne potroši i ostane u suvišku, to znači da je bilanca kisika pozitivna. Ako je količina kisika u eksplozivu nedovoljna za potpunu oksidaciju svih gorivih tvari, bilanca kisika je negativna. Uravnotežena bilanca kisika znači da su sve gorive tvari oksidirale, a kisika nije ostalo u suvišku (Krsnik, 1989).

Negativna bilanca kisika nije dobra iz razloga što bi plinovi nastali nakon eksplozije zbog nepotpunog oksidiranja sadržavali veće količine ugljičnog monoksida. Jače pozitivna bilanca kisika nije dobra jer bi došlo do stvaranja dušikovih oksida (Krsnik, 1989).

Kako nebi došlo do stvaranja ugljičnog monoksida ili dušikovih oksida, svi gospodarski eksplozivi bi trebali imati blago pozitivnu ili uravnoteženu bilancu kisika (Krsnik, 1989).

Štetni plinovi čije koncentracije su mjerne u svim tunelima koji su obučeni ovim radom (Brezik, Brinje, Grič, Plasina, Škurinje I, Škurinje II, Sleme, Trsat, Tuhobić, Veliki Gložac, Mala Kapela) su: ugljični monoksid (CO), ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), dušikov monoksid (NO) i dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>), dok su koncentracije sumporovog dioksida (SO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>) i acetaldehida (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O) mjerene samo u nekim tunelima.

##### 4.1. Kisik O<sub>2</sub>

Elementaran se nalazi u zraku gdje ga ima oko 21 %. U normalnim uvjetima gustoća mu iznosi 1,428kg/m<sup>3</sup>. Prema brzini spajanja kisika sa drugim elementima razlikujemo: oksidaciju, gorenje, eksploziju, detonaciju.

Količina O<sub>2</sub> koja je potrebna čovjeku ovisi o građi čovjeka i aktivnosti. U stanjumirovanja minimalna potrebna količina zraka iznosi 0,25 l/min., dok je kod kretanja takoličina između 1 l/min i 4 l/min O<sub>2</sub>.

Primarni uzroci smanjenja sadržaja kisika u rudnicima su: oksidacijski procesi raznih organskih i neorganskih materijala (drvo, ugljen, rude, okolne stijene), požari, eksplozije metana, eksplozije ugljene i sulfidne prašine, pritanje drugih plinova iz ležišta (metan,

ugljični dioksid, dušik). Sekundarni uzroci su: disanje ljudi, gorenje lampi, rad motora sa unutrašnjim sagorijevanjem(Jovičić et al,1987).

#### 4.2. Ugljični monoksid CO

Ugljični monoksid je plin bez boje okusa i mirisa gustoće  $1,2505 \text{ kg/m}^3$ . Sa zrakom u koncentracijama od 12,5 % do 74,2% stvara eksplozivne smjese. Najeksplozivnija je smjesa sa oko 30% CO. Temperatura paljenja smjese iznosi (630-810) °C. Veoma je otrovan. Vrlo lako se veže sa hemoglobinom iz krvi stvarajući karboksihemoglobin. Intenzitet vezivanja ugljičnog monoksida sa hemoglobinom je oko 300 puta veći od intenziteta vezivanja kisika. Simptomi trovanja su: glavobolja,ubrzan rad srca,razdražljivost,povraćanje,nesvjestica(Jovičić et al,1987).

Izvori ugljičnog monoksida u rudnicima su: miniranje,motori sa unutrašnjim sagorijevanjem, požari i eksplozije,kao i niskotemperaturna oksidacija ugljena. Ugljični monoksid kao plinoviti produkt miniranja,nastaje uvijek u znatnim količinama, što zavisi od sastava eksploziva(Jovičić et al, 1987).

#### 4.3. Ugljični dioksid CO<sub>2</sub>

Ugljični dioksid je plin bez boje i mirisa,kiselkastog okusa. Gustoća mu je  $1,9768 \text{ kg/m}^3$ , ne podržava disanje ni gorenje.

Nastaje: razlaganjem i truljenjem organskih materijala,procesima raspadanja i metamorfizma stijena i slojeva organskog i neorganskog porijekla,procesima oksidacije ugljena,djelovanjem nekih rudničkih voda na karbonatne stijene,izdvajanjem iz ugljenih slojeva u kojima se nalazi još neotplinjen kao produkt procesa karbonifikacije.

Kod 1% CO<sub>2</sub> čovjek počinje ubrzano disati; kod 3% disanje se udvostručuje,što je manje opasno pri mirovanju, ali djeluje ugrožavajuće ako se u takvoj atmosferi obavlja fizički rad. U atmosferi sa 5% disanje je vrlo otežano,a kod 7% dolazi do osjećaja slabosti uz izraženo znojenje. Nesvjestica nastupa kod 10% CO<sub>2</sub>,a smrtna opasnost kod koncentracije 20 % do 25%.Pošto je CO<sub>2</sub> znatno teži od zraka, sakuplja se u najnižim dijelovima prostorija,pa se o toj činjenici mora voditi računa pri rješavanju problema provjetravanja (Jovičić et al, 1987).

#### 4.4. Dušikov monoksid NO

Dušikov monoksid je veoma otrovan. Gustoća mu je  $1,340 \text{ kg/m}^3$ . Njegovo djelovanje je slično djelovanju ugljičnog monoksida, ali otrovnost nastaje već kod nižih koncentracija. Nastaje: miniranjem, radom motora sa unutrašnjim sagorijevanjem i kao posljedica radova na elektrozavarivanju (Jovičić et al, 1987).

#### 4.5. Dušikov dioksid NO<sub>2</sub>

Jako otrovan plin crveno-smeđe boje, gustoće  $2,62 \text{ kg/m}^3$ . Naročito je djelovanje ovog plina na pluća, jer čovjek u početku ne osjeća nikakve poteškoće, a smrt od oticanja pluća nastupa poslije 20-30 sati, a ponekad i poslije nekoliko dana. Ovakva reakcija nastaje zato što dušikov monoksid, koji se udiše, u kontaktu sa vlagom iz pluća, stvara dušičnu kiselinu. Pod utjecajem te kiseline dolazi do postepenog povećanja plućnih alveola i kasnije do njihovog razaranja. Nastaje isto kao i NO: miniranjem, radom motora sa unutrašnjim sagorijevanjem i kao posljedica radova na elektrozavarivanju (Jovičić et al, 1987).

#### 4.6. Sumporov dioksid SO<sub>2</sub>

Bezbojan plin, oštrog mirisa, gustoće  $2,845 \text{ kg/m}^3$ . Jako nagrizava sluznicu, naročito oči, i to djelovanje se očituje već kod sadržaja od 0,002%. Može se osjetiti u vrlo malim količinama, od svega 0,0005%. Opasnost po život nastaje kod 0,05%, čak i pri kratkotrajnom udisanju. Sumporov dioksid se u rudnicima javlja u vrlo malim količinama. Veće količine mogu se javiti pri požarima u rudnicima sulfidnih ruda, pri miniranju takvih ruda ili pri korištenju eksploziva koji sadrže sumpor (Jovičić et al, 1987).

#### 4.7. Metan CH<sub>4</sub>

Metan je jedan od najopasnijih sastojaka atmosfere rudnika pri eksploataciji ležišta ugljena, soli, i nekih drugih mineralnih sirovina. To je plin bez boje, okusa i mirisa gustoće  $0,716 \text{ kg/m}^3$ . Nije otrovan, ali njegove povećane koncentracije u zraku utječu na smanjenje sadržaja kisika (Jovičić et al, 1987).

Metan je već u malim količinama izuzetno zapaljiv i eksplozivan (najveća energija eksplozije kod 9,5 %, a najmanja energija paljenja kod 8 %). Eksplozivan je u smjesi sa zrakom u granicama od 5 % do 15 %. Izvori metana su požari kod kojih metan nastaje kao

produkt suhe destilacije ugljena. Metan se može pojaviti i kod starih rudnika. Budući je metan plin lakši od zraka, skuplja se u stropu prostorije.

#### 4.8. **Acetaldehid**

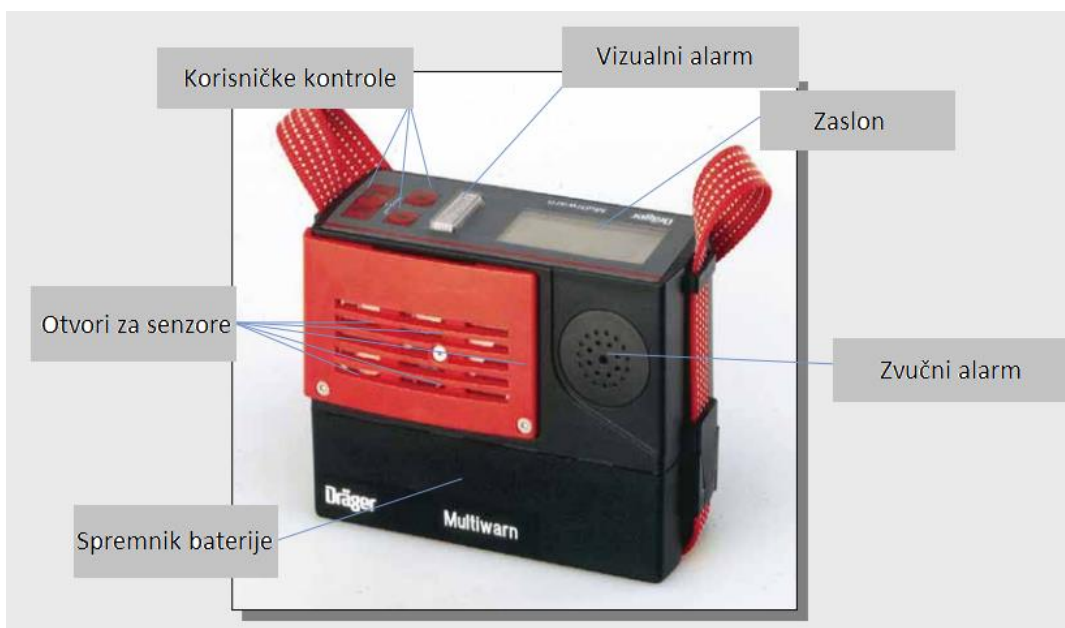
Acetaldehid je bezbojna lako hlapljiva tekućina, oštra mirisa. Pare acetaldehida su zapaljive, eksplozivne i veoma otrovne. Pri temperaturi od 20°C gustoća mu je 0,788 kg/m<sup>3</sup>. Industrijski se proizvodi oksidacijom etanola. Pare acetaldehida su iritantne za oči, nos i grlo. Inhalacija visokih koncentracija može izazvati vrtoglavicu i nesvjesticu. Uzrokuje respiratorne probleme i pretpostavlja se da je kancerogen. Onečišćivač je zraka u procesu sagorijevanja poput motora sa unutarnjim sagorijevanjem i duhanskog dima.

## 5. MJERENJA PRI MINIRANJIMA

U tunelima „Brezik“, „Brinje“, „Grič“, „Plasina“, „Škurinje I“, „Škurinje II“, „Sleme“, „Trsat“, „Tuhobić“, „Veliki Gložac“ i „Mala Kapela“ obavljena su mjerenja imisija štetnih i opasnih plinova u tunelskom prostoru za vrijeme radnih operacija bušenja i miniranja te utovara i odvoza. Također su mjereni ventilacijski parametri, brzine izlazne zračne struje na ispustu ventilacijske cijevi te su snimani mikroklimatski parametri (temperatura, relativna vlažnost i atmosferski tlak zraka). U svim tunelima mjerenja imisija opasnih i štetnih plinova obavljena su uređajem Multiwarn II aktivnim načinom mjerenja. Osim aktivnog načina, postoji i pasivan način mjerenja štetnih plinova.

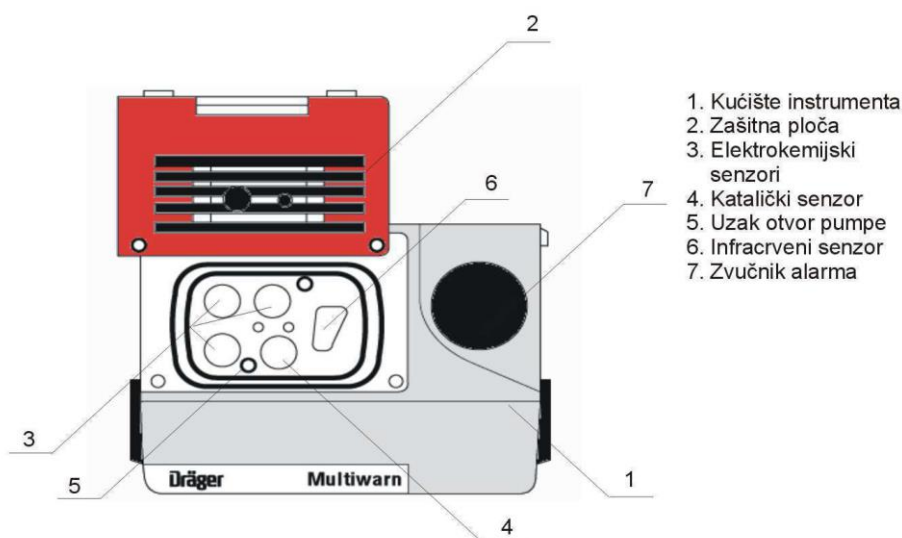
### 5.1. Aktivan način mjerenja koncentracija plinovitih onečišćujućih tvari uređajem Multiwarn II

Aktivno mjerenje koncentracije plinova podrazumijeva da se pomoću crpke uređaja kojim se mjeri, zrak uvlači kroz neki adsorbent. Na tom principu radi i Multiwarn II (Dräger, Njemačka). Na slikama 5-1 i 5-2 prikazani su glavni dijelovi uređaja Multiwarn II.



Slika 5-1. Dijelovi uređaja Multiwarn II





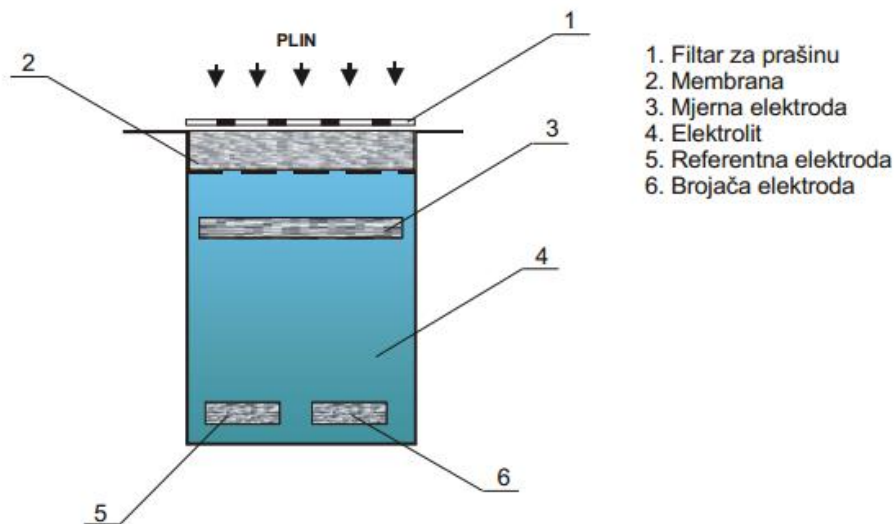
Slika 5-2. Detaljniji prikaza dijelova uređaja Multiwarn II (Vujević, 2012)

Pomoću crpke u uređaju uzorkujemo plinove. Uređaj kontrolira rad crpke i uključuje alarm u slučaju da crpka nepravilno radi (dovodinedovoljnu količinu zraka) i ukoliko je usisni kanal blokiran. Jačina zvučnog alarma je viša od 85 dB. Uređaj ima mogućnost mjerenja koncentracije onečišćujućih plinova do udaljenosti 45 m i ima mogućnost prikaza očitavanja sa 5 senzora. Prednosti uzorkovanja pomoću crpke: brzo se omogućuje analiza mjerenja, mjeri se prije ulaska u prostore. Crpka može raditi u uvjetima nisketemperature (-40 °C) i visoke temperature (50 °C), bez obzira kakvo je stanje sa vlagom i prljavštinom. Uzorkovani goriviplinovi spaljuju se u ćeliji. Dobivena toplina služi za mjerenje koncentracije nekekomponente u plinu. Vrsta senzora (elektrokemijski, katalitički, infracrveni) za mjerenje koncentracije plinova ovisi o vrsti plina kojem mjerimo koncentraciju (Vujević, 2012).

### 5.1.1. Elektrokemijski senzor

Na slici 5-3 prikazan je elektrokemijski senzor i njegovi dijelovi. Zrak najprije prolazi kroz filtar za prašinu (1) na kojem se zadržavaju krupne čestice. Nakon toga zrak prolazi kroz plastičnu membranu (2) i dolazi do tekućeg elektrolita (4) koji posjeduje svojstvo ionske vodljivosti. U elektrolitu su 3 elektrode: mjerna (3), referentna (5) i brojača (6). Na elektrodama se odvijaju kemijske reakcije redukcije i oksidacije (Vujević, 2012).

Elektrokemijskim senzorima se mjere koncentracije CO, NO, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S i O<sub>2</sub>.



1. Filtar za prašinu
2. Membrana
3. Mjerna elektroda
4. Elektroлит
5. Referentna elektroda
6. Brojača elektroda

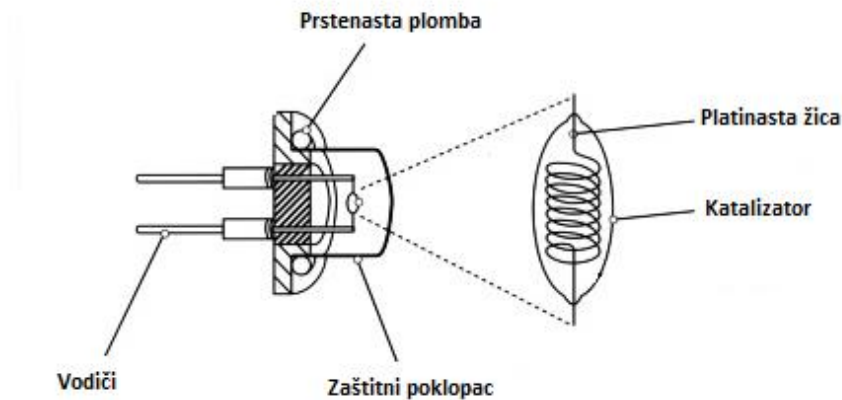
Slika 5-3. Elektrokemijski senzor (Vujević, 2012)

### 5.1.2. Katalitički senzor

Katalitički senzor se sastoji od dvije platinske spirale sa keramičkim premazom (pellistorom). Jedan pellistor (Slika 5-4) je natopljen sa katalizatorom od paladija koji izaziva reakciju oksidacije. Taj pellistor predstavlja detektor dok drugi pellistor predstavlja kompenzator, a oba su fiksirana na nezapaljivom kućištu.

Katalitički senzor radi na način da se na površini katalitičkog elementa zbiva reakcija oksidacije zbog električnog zagrijavanja. Kroz spirale prolazi struja i zagrijava ih do temperature od 450 °C što dovodi do oksidacije plina. Kad plin sagori, oksidacija izaziva porast temperature u detektirajućem pellistoru, ali ne i u referentnom, što izaziva izbacivanje Wheatstenovog mosta iz ravnoteže. Wheatstenov most povezuje spirale.

Katalitički senzori mogu se koristiti samo u okruženjima u kojima je koncentracija kisika veća od 15%. U mogućnosti su detektirati svaki plin u zraku kojeg mogu potaknuti na gorenje. U području rudarstva se primarno koriste za detekciju metana (CH<sub>4</sub>), ali mogu poslužiti i za etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), ugljični monoksid (CO), vodik (H<sub>2</sub>).

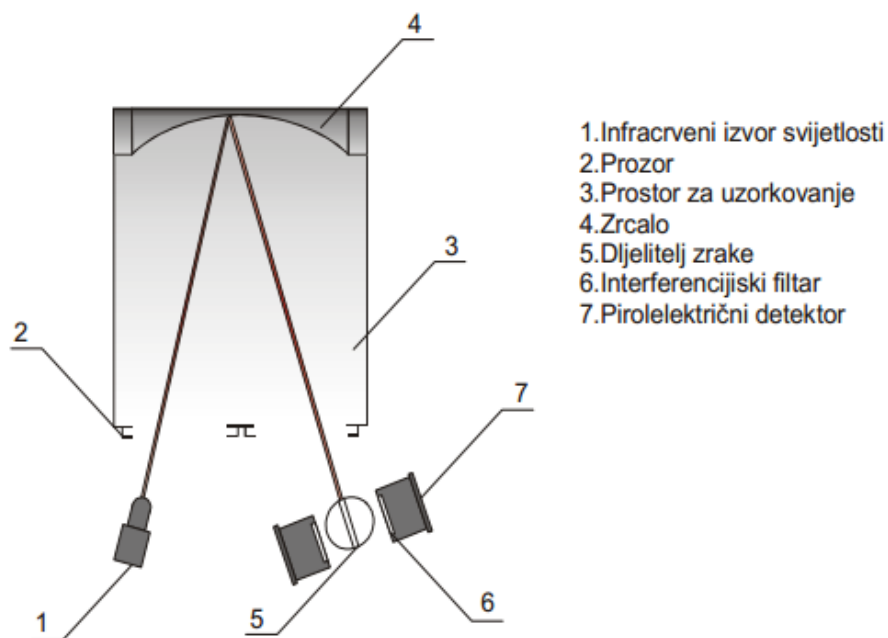


Slika 5-4. Jedan pellistor katalitičkog senzora

### 5.1.3. Infracrveni senzor

Na slici 5-5 je infracrveni senzor. Zrak se uzorkuje u prostoru za uzorkovanje (3) gdje se usisava pomoću crpke. Infracrveni izvor svjetlosti odašilje zraku koja dolazi do djeljitelja zrake (5). Jedan dio zrake prolazi kroz interferencijski filterar (6), a ostali dio zračenja prolazi kroz referentni filterar nakon čega dolazi u referentni detektor. (Vujević, 2012).

Infracrvenim senzorom mogu se mjeriti koncentracije CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> i NO.



Slika 5-5. Infracrveni senzor (Vujević, 2012)

## 5.2. Krilni anemometar

Mjerenja količine zraka na ispustima ventilacijskih cijevi obavljena su krilnim anemometrima. Anemometar je mjerni instrument za mjerenje jačine vjetra i brzine strujanja zraka. Osim krilnog anemometra postoji još nekoliko vrsta anemometara: anemometar s lopaticama, ultrazvučni anemometar, laser doppler anemometar, i anemometar s ugrijanom žicom. Na slici 5-6 je anemometar kakav je korišten za mjerenje količine zraka na ispustima ventilacijskih cijevi u nekima od tunela obuhvaćenih ovim radom.



Slika 5-6. Digitalni krilni anemometar DA4000.

## 5.3. Mjerenje ventilacijskih parametara

Za mjerenja ventilacijskih parametara, tj. za mjerenje padova tlakova duž ventilacijskih cijevi u tunelima „Škurinje I“, „Škurinje II“, „Sleme“, „Trsat“ i „Tuhobić“, korištena je Airflow Pitot-Pradtlova cijev s priključkom na manometar Airflow digital manometer DM2L.

Pomoću Pitot-Pradtlove cijevi, koja je prikazana na slici 5-7, mjere se ukupni i statički tlak. Ulazni otvor cijevi se stavlja u struju fluida, a drugi spaja na manometar. Vanjska cijev je izolirana od dinamičkog tlaka te se na njoj mjeri samo statički tlak. Na unutarnjoj cijevi mjeri se ukupni tlak kojeg čine statički tlak i dinamički tlak. Iz razlike ukupnog tlaka

i statičkog tlaka dobiva se dinamički tlak. Jednadžba (5-1) prikazuje izračun brzine strujanja zraka pomoću izmjerenog ukupnog tlaka, statičkog tlaka i gustoće zraka:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (5-1)$$

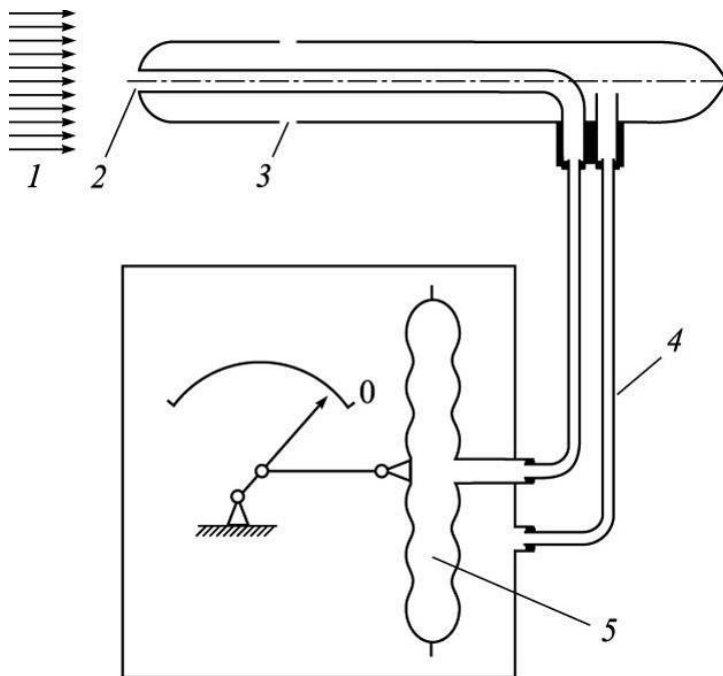
gdje je:  $v$  – brzina zraka m/s,

$p_1$  – ukupni tlak Pa,

$p_2$  – statički tlak Pa,

$\rho$  – gustoća zraka kg/m<sup>3</sup>.

Na slici 5-7 (1) predstavlja strujanje zraka, (2) otvor na čelu oklopa za ukupno mjerenje tlaka, (3) i (4) otvori i cijevi na oklopu za mjerenje statičkog tlaka, (5) aneroidni barometar.



Slika 5-7. Pitot-Pradtlova cijev

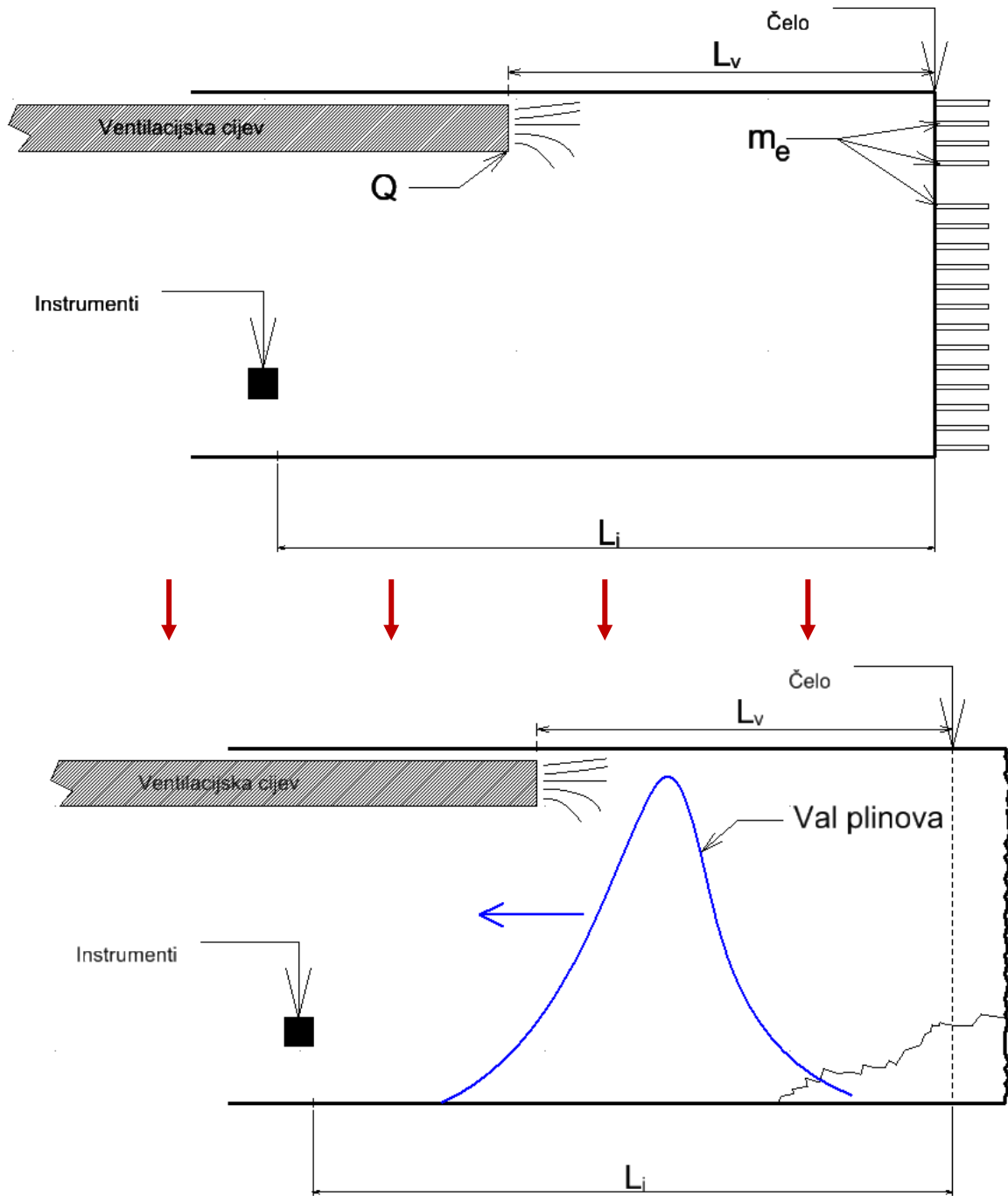
#### 5.4. Parametri s najvećim utjecajem na koncentracije štetnih plinova

Prilikom miniranja, na koncentraciju oslobođenih plinova najviše utječu tri ključna parametra, a to su količina eksploziva, dobavna količina zraka i udaljenost ispusta ventilacijske cijevi od čela tunela. Može se očekivati da će s povećanjem količine eksploziva rasti vršna i ekvivalentna koncentracija plinova te da će duže vremena trebati da se koncentracija razrijedi. Povećanje udaljenosti ispusta ventilacijske cijevi od čela tunela ne može utjecati na ukupnu količinu štetnih plinova, ali posljedično se može očekivati duže

vrijeme razrijeđenja. Veća dobavna količina zraka također ne može utjecati na količinu i vršnu koncentraciju štetnih plinova, ali se očekuje da će imati utjecaj na vrijeme razrijeđenja tako što će ga skratiti.

Na slici 5-8 skicirana je situacija u kakvoj je provedeno mjerenje. U bušotine na čelu tunela postavljena je određena količina eksploziva ( $m_e$ ), koja je bila poznata mjeriteljima. Na određenoj udaljenosti od čela tunela ( $L_v$ ) nalazi se ispušni ventilacijske cijevi na kojem je zabilježen protok ( $Q$ ). Također na nekoj udaljenosti ( $L_i$ ) postavljeni su mjerni instrumenti, no ta udaljenost nije razmatrana u radu, budući su instrumenti prilikom mjerenja smješteni u blizini ispusta ventilacijske cijevi.

Nakon detonacije eksploziva oslobađaju se plinovi koji se, nakon što pomognu u razrušavanju stijene na čelu, počinju kretati prema izlazu iz tunela pod utjecajem protoka zraka iz ventilacijske cijevi. Sumarno kretanje plinova prema izlazu tunela može se zamisliti kao val koji na svom putu prelazi preko mjernih instrumenata na kojima se bilježi njihova koncentracija. Takav očekivani val plinova skiciran je na slici 5-8.



**Slika 5-8.** Skica situacije prilikom mjerenja

U tablici 5-1 navedeni su podaci iz izvještaja o količini eksploziva, veličini protoka na ispust ventilacijske cijevi i udaljenosti ispusta ventilacijske cijevi od čela koji su korišteni u ovom radu.

**Tablica 5-1.** Podaci o udaljenosti cijevi, protoku i eksplozivu

<b>Tunel</b>	<b>Udaljenost cijevi od čela (m)</b>	<b>Protok (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Količina eksploziva (kg)</b>
Brezik	95	32,64	154
Brinje	83,1	41	166,6
Brinje	53	43,9	350
Grič	90,2	-	-
Grič	71,7	71,93	-
Grič	30	-	275
Grič	64	26,62	411
Plasina	90,5	25,16	546
Plasina	140	31,02	498
Sleme	80	17,31	203
Škurinje I	-	25,98	166
Škurinje II	33	14,27	122,3
Trsat	-	18,23	189,6
Tuhobić	-	13,8	279,18
Veliki Gložac	50	12,99	180
Mala Kapela	101	23,28	294,5
Mala Kapela	107	31,49	369,5
Mala Kapela	76	-	294,5
Mala Kapela	75	-	482,75
Mala Kapela	105	23,01	473,5
Mala Kapela	82	20,79	523
Mala Kapela	80	-	484
Mala Kapela	46	15,68	225,75
Mala Kapela	42	13,73	619,25
Mala Kapela	89	-	491,5
Mala Kapela	195	13,88	593
Mala Kapela	59	12,59	534
Mala Kapela	65	-	439



Kao što se i može vidjeti u tablici 5-1, za vrijeme mjerenja u nekim tunelima nisu izmjereni svi podaci. Također, valja napomenuti da postoji mogućnost da oni podaci koji su izmjereni i u koje je postojao uvid, nisu potpuno točni, već da odstupaju za neki iznos. Npr., veličina protoka može biti netočna jer ovisi kojom snagom je u pogon pušten ventilator, a mjerenja protoka izvođena su nakon izvedenog miniranja.

## 6. OBRADA PODATAKA

Izmjerne koncentracije štetnih plinova u tunelima „Brezik“, „Brinje“, „Grič“, „Plasina“, „Škurinje I“, „Škurinje II“, „Sleme“, „Trsat“, „Tuhobić“, „Veliki Gložac“ te „Mala Kapela“ analizirat će su u ovom radu u svrhu utvrđivanja kako količina eksploziva, protok na izlazu vjetrene cijevi i udaljenost ispusta vjetrene cijevi od čela tunela utječu na ekvivalentnu koncentraciju, vršnu koncentraciju i pad koncentracije odnosno vrijeme razrjeđenja.

### 6.1. Analiza kretanja koncentracija štetnih plinova na radilištu tunela

Dijagram na slici 6-1 prikazuje kretanje koncentracija štetnih plinova u radnom prostoru tunela kroz određeni vremenski period.

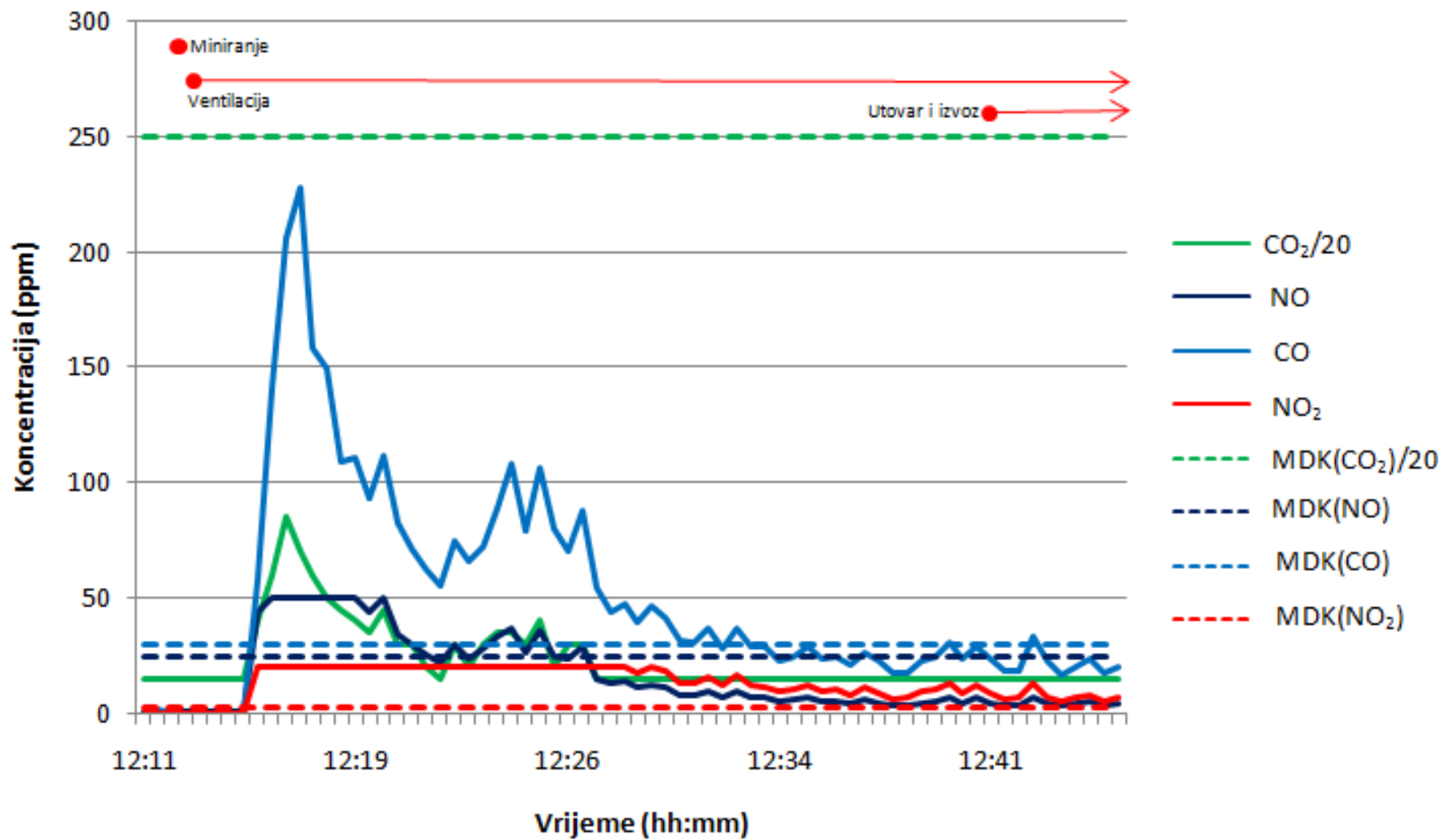
Na dijagramu je primjer koncentracija plinova iz tunela „Brezik“. Miniranje je izvedeno u 12:13:00 h. Dvije i pol minute nakon, kad su plinovi stigli do senzora, na mjernom uređaju je zabilježen nagli skok koncentracija svih plinova i na dijagramu se može vidjeti da su svi plinovi, osim CO<sub>2</sub>, premašili svoje maksimalne dopuštene koncentracije (isprekidane linije) prema Pravilniku o maksimalno dopustivim koncentracijama štetnih tvari u atmosferi radnih prostorija i prostora i o biološkim graničnim vrijednostima (NN 92/93).

Nakon miniranja uključena je ventilacija koja uzrokuje pad koncentracije štetnih plinova i uočava se tendencija pada koncentracije uslijed rada ventilacije. Svaki plin se kroz određeno vrijeme spušta ispod MDK, osim koncentracije CO<sub>2</sub>, koja nije niti premašila MDK.

Na desnom dijelu dijagrama vidi se trend nešto sporijeg smanjivanja koncentracije koja ne pokazuje naznake da će pasti na nulu, već počinje varirati unutar određenih nižih vrijednosti. Uzor tome je, osim ostataka plinova proizvedenih miniranjem, i početak procesa utovara i izvoza koji u ovom slučaju kreće u 12:41 h. U daljnjem procesu utovar i izvoz, tj. ispušni plinovi pogonskih motora sa unutarnjim sagorijevanjem bit će glavni uzor emisija štetnih plinova.

Također se može uočiti da se koncentracija CO<sub>2</sub> (puna zelena linija) nakon početnog naglog skoka uzrokovanog miniranjem spušta na svoju uobičajenu razinu od 300 ppm-a ili 0.03%, koliko ga ima u sastavu zraka. Na dijagramu, to je vidljivo kao niz istih vrijednosti na osi ordinata. Kasnije će se ta razina malo podignuti zbog rada mehanizacije na dizel pogon.

Ugljični monoksid (CO), dušikov monoksid (NO) te dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>) prilikom miniranja višestruko premašuju maksimalno dopuštene koncentracije. Višna izmjerena koncentracija za dušikov monoksid iznosi 50 ppm-a, što je i najveća vrijednost koju senzor uređaja može izmjeriti za taj plin. Iz tog razloga se ona na dijagramu vidi kao niz vrijednosti od 50 ppm-a na osi ordinata. Sa sigurnošću se može pretpostaviti da se najviša vrijednost koncentracije NO kretala znatno iznad 50 ppm-a. Sličan slučaj je i sa dušikvim dioksidom za koji senzor uređaja može izmjeriti najviše 20 ppm-a, pa se i za koncentraciju tog plina može zaključiti da se kretala iznad te vrijednosti neko vrijeme. U trenutku kad je počeo utovar i izvoz, koncentracija NO<sub>2</sub> je još uvijek bila iznad dozvoljenih 3 ppm-a.



Slika 6-1. Vremenski dijagram koncentracije plinova

## 6.2. Sastav plinova miniranja

Na temelju ekvivalentne koncentracije svakog štetnog plina i sumarne ekvivalentne koncentracije svih štetnih plinova, može se otprilike dobiti postotak sa kojim svaki pojedini plin sudjeluje u ukupnoj koncentraciji. Procjenjeni udjeli u ukupnoj koncentraciji štetnih plinova su slijedeći: NO (1,29 %), CO (13,31%), NO<sub>2</sub> (0,64%), CO<sub>2</sub> (85,43%), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O (1,40%).

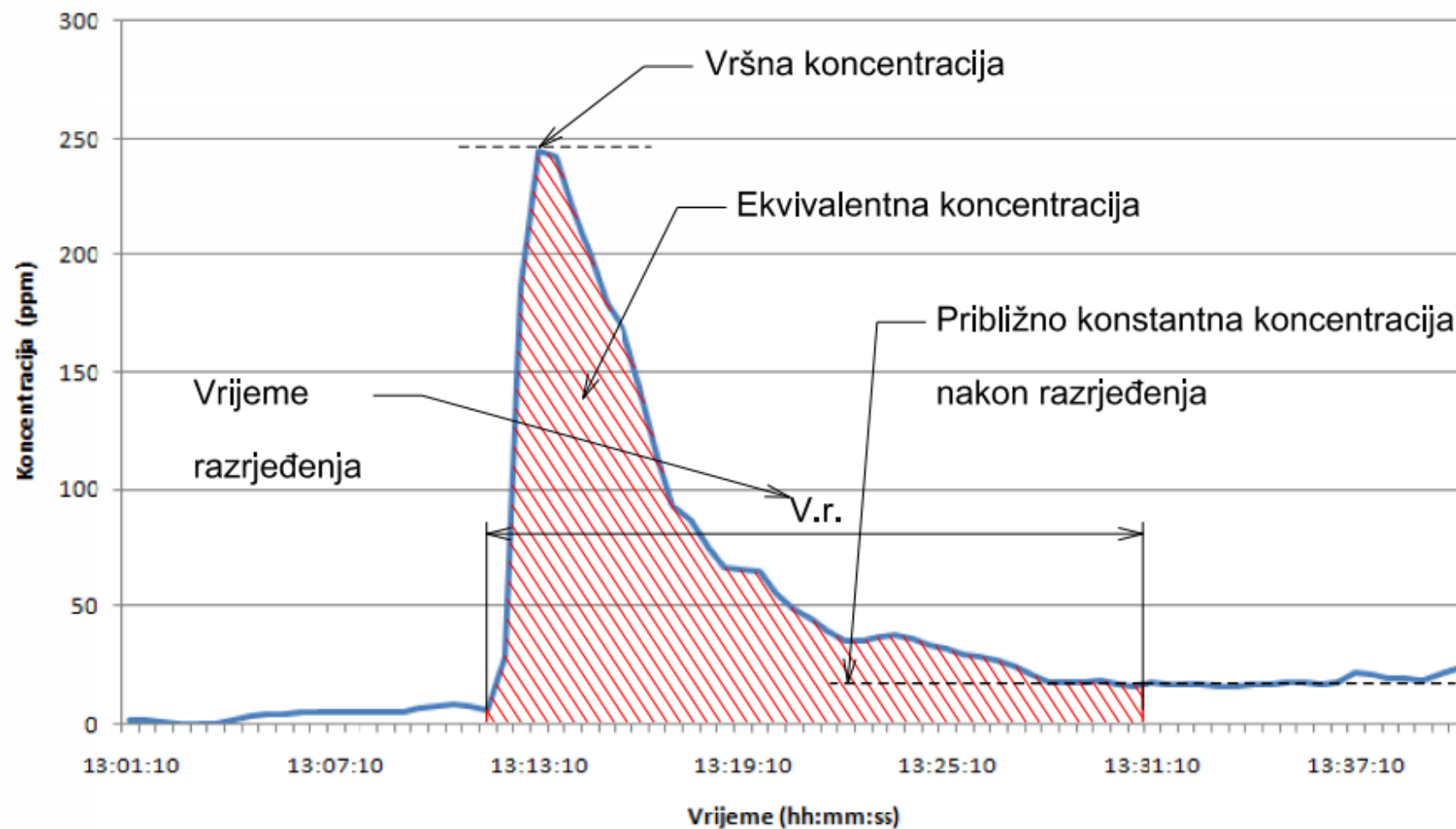
## 6.3. Primjer obrade podataka i očekivani rezultati

Vršna koncentracija je najviša izmjerena koncentracija nekog plina u promatranom periodu. Sumarna vršna koncentracija svih štetnih plinova u slučaju tunela „Brinje“ iznosila je 2044,76 ppm-a. Na dijagramu na slici 6-2 prikazana je vršna koncentracija od 244,76 ppm-a. To je vrijednost sumarne vršne koncentracije ugljičnog monoksida, ugljičnog dioksida, dušičnog monoksida i dušičnog dioksida u lijevoj cijevi tunela „Brinje“. Iz razloga što u zraku ugljičnog dioksida ima oko 300 ppm-a, on je reduciran za taj isti iznos da bi se isključio utjecaj njegove normalne koncentracije u zraku.

Ekvivalentna koncentracija plina dobije se na način da se u nekom promatranom periodu vremena odredi prosječna koncentracija tog istog plina, te se ona pomnoži sa vremenom unutar tog perioda koji smo odlučili promatrati. Prosječna koncentracija plina dobije se tako da se zbroje sve koncentracije nekog plina u promatranom periodu vremena i njihov zbroj se podijeli sa brojem mjerenja u tom istom periodu. Drugim riječima, ekvivalentna koncentracija je površina ispod dijagrama koncentracija-vrijeme. Za primjer ćemo uzeti sumarnu koncentraciju CO, NO i NO<sub>2</sub> u tunelu „Brinje“. Ako bismo htjeli odrediti ekvivalentnu koncentraciju za kompletno trajanje mjerenja, pomnožili bismo prosječnu koncentraciju sume plinova koja iznosi 22,4 ppm sa vremenom koje u ovom slučaju iznosi 122,5 min. Dobili bi vrijednost 2744 ppm\*min. Obzirom da će se u ovom radu analizirati samo radnja miniranja te kako ono utječe na oslobođene štetne plinove, vrijednost ekvivalentne koncentracije bit će proučavana unutar kraćeg razdoblja mjerenja, od trenutka od kojeg uređaj počinje bilježiti nagli porast koncentracija pa do nekog trenutka u kojem se može uočiti približno konstantna koncentracija nakon razrjeđenja, što je obično nekoliko minuta prije početka utovara i izvoza. Za takav primjer opet ćemo uzeti sumarnu koncentraciju plinova u tunelu „Brinje“. Odredit ćemo prosječnu koncentraciju unutar perioda 19,5 minuta, gdje se vidi najveći utjecaj miniranja. Ta koncentracija iznosi

71,83 ppm, a kad se pomnoži s vremenom od 19,5 min, dobije se vrijednost ekvivalentne koncentracije od 1400,69 ppm\*min.

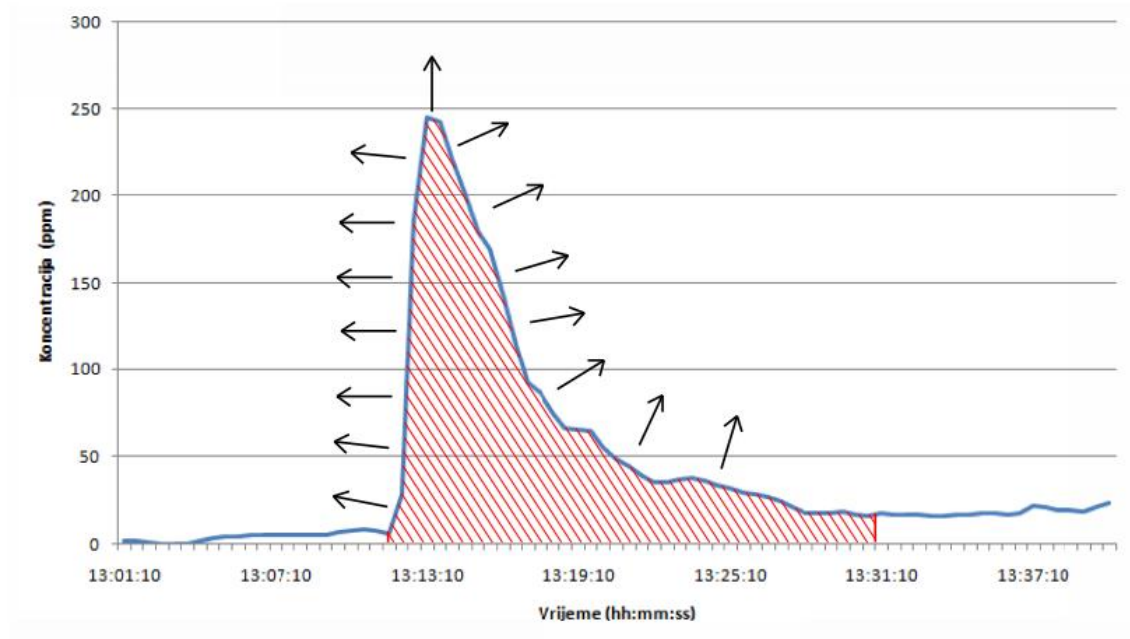
Vrijeme razrjeđenja je period vremena od točke u kojoj uređaj počinje bilježiti nagli porast koncentracije plionva do točke u kojoj se može uočiti približno konstantna koncentracija nakon razrjeđenja. Na slici 6-2 je primjer promatranog vremena razrjeđenja.



Slika 6-2. Vremenski dijagram razrjeđenja svih plinova

### 6.3.1. Očekivani utjecaj eksploziva na promjenjive varijable

Slika 6-3 prikazuje očekivani utjecaj povećanja količine eksploziva na ukupnu koncentraciju štetnih plinova. Očekuje se da bi veća količina eksploziva povećala i vrijednosti vršne i ekvivalentne koncentracije štetnih plinova, a samim time bi se i produljilo vrijeme razrjeđenja.

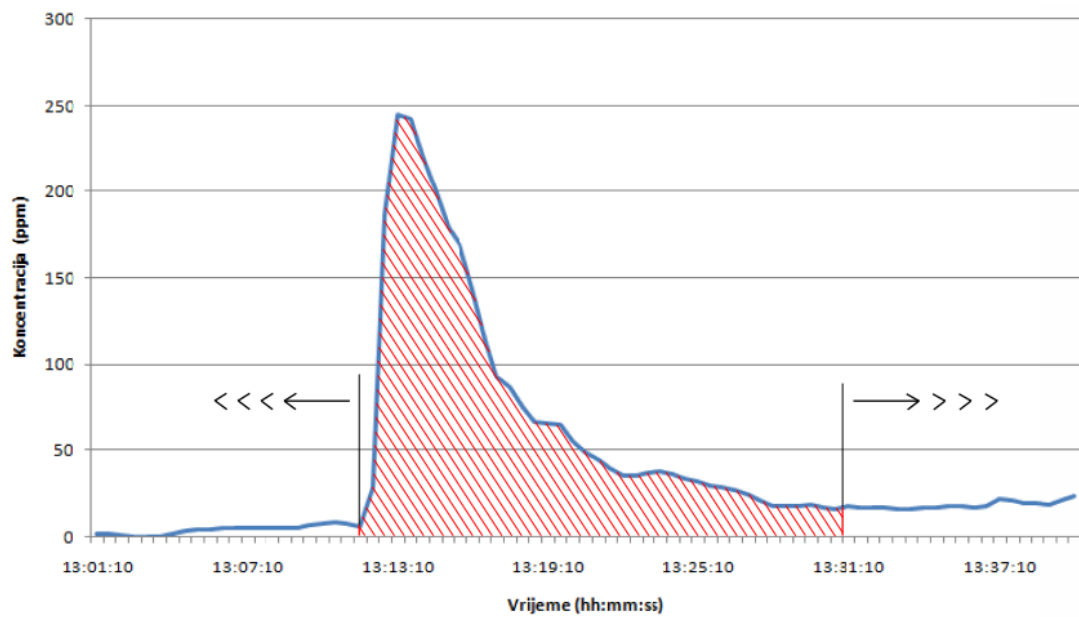


Slika 6-3. Zavisnost koncentracije štetnih plinova o količini eksploziva

### 6.3.2. Očekivani utjecaj udaljenosti ventilacijske cijevi na promjenjive varijable

Na dijagramu na slici 6-4 skicirano je kako bi povećanje udaljenosti ventilacijske cijevi utjecalo na val plinova koji se kreće od čela tunela prema izlazu. Očekuje se da će povećanjem udaljenosti cijevi biti potrebno duže vremena za razrjeđenje, tj. val plinova će duže vrijeme putovati prema izlazu tunela.

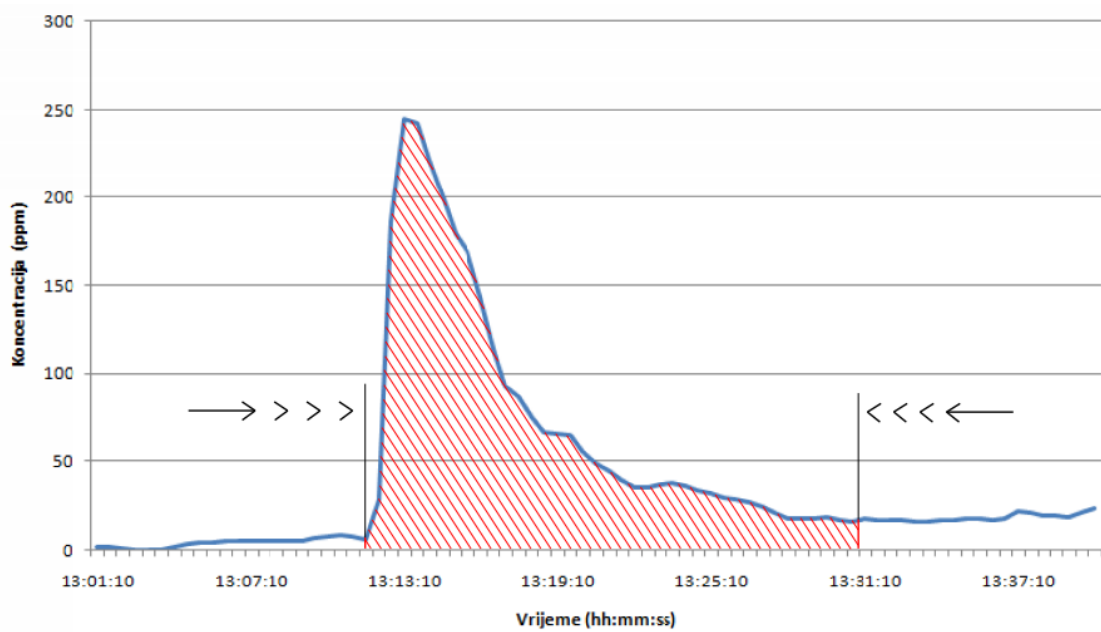




Slika 6-4. Produljenje vremena razrjeđenja

### 6.3.3. Očekivani utjecaj protoka zraka na promjenjive varijable

Povećanjem protoka zraka, očekuje se kraće vrijeme potrebno za razrjeđenje plinova. Takav slučaj je prikazan na slici 6-5.



Slika 6-5. Skraćenje vremena razrjeđenja

#### 6.4. Rezultati

Obradom podataka metodom višestruke regresijske analize u programskom paketu Statistica dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablicama 6-1, 6-2 i 6-3.

**Tablica 6-1.** Ovisnost ekvivalentne koncentracije o nepromjenjivim varijablama

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(13)	p-level
Intercept			3535,768	24838,50	0,142350	0,888986
Udaljenost	0,219334	0,254954	155,749	181,04	0,860289	0,405217
Protok	-0,151911	0,239578	-440,730	695,07	-0,634076	0,537029
Eksploziv	0,398403	0,257520	66,909	43,25	1,547075	0,145836

U tablici 6-1 navedene su vrijednosti na temelju kojih se može zaključiti kako će nepromjenjive varijable (udaljenost, protok i eksploziv) utjecati na ekvivalentnu koncentraciju. Vrijednost Beta su veličine koje pokazuju u kolikoj mjeri pojedina nepromjenjiva varijabla utječe na promjenjivu, u ovom slučaju ekvivalentnu koncentraciju. Prema tablici 6-1 Najveću vrijednost Beta ima eksploziv stoga se zaključuje da on najviše od tri nepromjenjive varijable utječe na ekvivalentnu koncentraciju. S obzirom da je vrijednost Beta za eksploziv pozitivna još se zaključuje da eksploziv povećava ekvivalentnu koncentraciju, što je i bila pretpostavka.

Vrijednosti B su koeficijenti jednadžbe kojom bi se mogla izračunati vrijednost ekvivalentne koncentracije na temelju izmjerenih varijabli. Jednadžba glasi:

$$Ekv = 3535,769 + 155,749 \cdot u - 440,730 \cdot p + 66,909 \cdot e, \quad (6-1)$$

gdje je:  $Ekv$  – ekvivalentna koncentracija ppm\*min

$u$  – udaljenost m,

$p$  – protok m<sup>3</sup>/s,

$e$  – eksploziv kg.

**Tablica 6-2.** Ovisnost vršne koncentracije o nepromjenjivim varijablama

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(13)	p-level
Intercept			1087,253	1351,562	0,80444	0,435607
Udaljenost	0,310903	0,219883	13,929	9,851	1,41395	0,180876
Protok	-0,275820	0,206622	-50,448	37,882	-1,33490	0,204816
Eksploziv	0,433667	0,222096	4,595	2,353	1,95261	0,072738

U tablici 6-2 navedene su vrijednosti na temelju kojih se može zaključiti kako će nepromjenjive varijable (udaljenost, protok i eksploziv) utjecati na vršnu koncentraciju. I u ovom slučaju najveću vrijednost Beta ima eksploziv, pa se zaključuje da i na vršnu koncentraciju eksploziv utječe više od udaljenosti cijevi i protoka, što je i bila početna pretpostavka.

Za vršnu koncentraciju jednadžba glasi:

$$Vr = 1087.253 + 13.929 \cdot u - 50.448 \cdot p + 4.959 \cdot e, \quad (6-2)$$

gdje je:  $Vr$  – vršna koncentracija ppm

$u$  – udaljenost m,

$p$  – protok m<sup>3</sup>/s

$e$  – eksploziv kg.

**Tablica 6-3.** Ovisnost vremena razrjeđenja o nepromjenjivim varijablama

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(13)	p-level
Intercept			26,86043	10,32738	2,60089	0,23188
Udaljenost	0,310898	0,249715	0,09546	0,07667	1,24501	0,236892
Protok	-0,477616	0,233635	-0,59629	0,29168	-2,04437	0,063499
Eksploziv	0,189240	0,252151	0,01367	0,01820	0,75126	0,466976

U tablici 6-3 navedene su vrijednosti koje prikazuju utjecaj nepromjenjivih varijabli (udaljenost, protok i eksploziv) na vrijeme razrjeđenja. Prema apsolutnim vrijednostima Beta, najveći utjecaj imat će protok. Predznak minus označuje da protok djeluje tako što smanjuje vrijeme razrjeđenja, što je i bila početna pretpostavka. Slijedeća najveća

apsolutna vrijednost Beta je ona za udaljenost cijevi, dok je najmanja za eksploziv, što je i logično jer količina eksploziva nema toliko velik utjecaj na vrijeme razrjeđenja kao prethodne dvije varijable (udaljenost i protok).

Za vrijeme razrjeđenja jednadžba glasi:

$$Raz = 26.86043 + 0.09546 \cdot u - 0.59629 \cdot p + 0.01367 \cdot e, \quad (6-3)$$

gdje je:  $Raz$  – vrijeme razrjeđenja min

$u$  – udaljenost m,

$p$  – Protok  $m^3/s$ ,

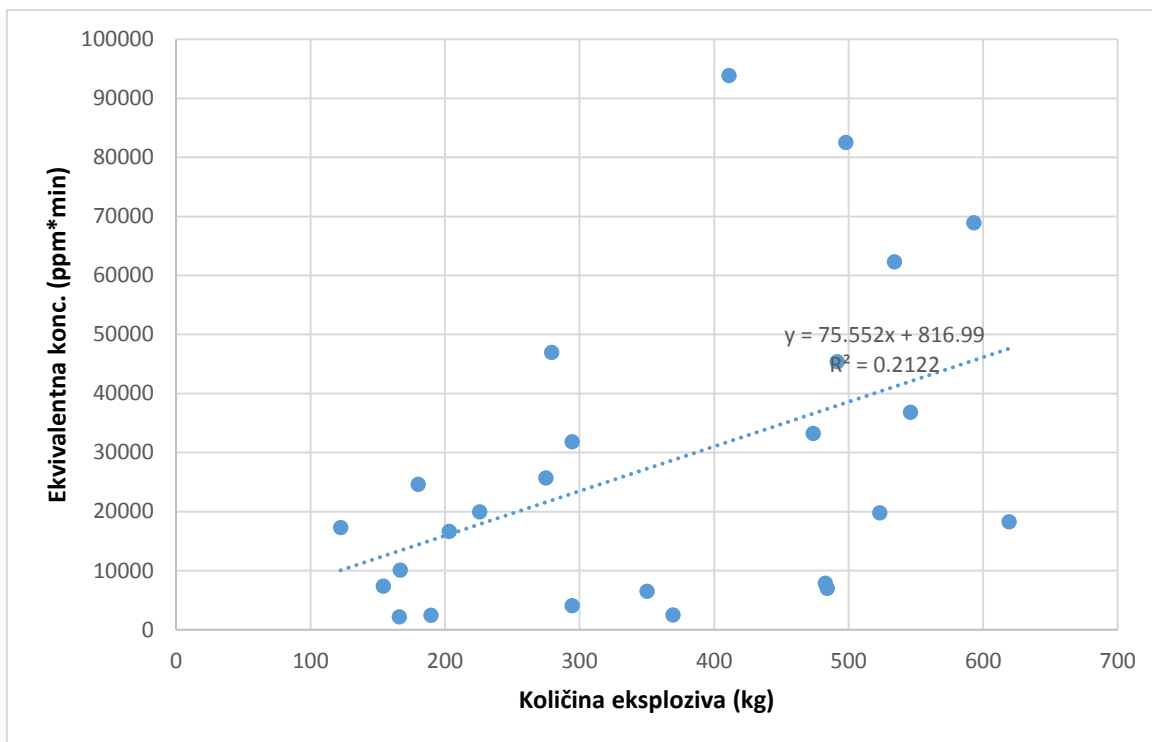
$e$  – eksploziv kg.

Valja napomenuti da jednadžbe (6-1), (6-2) i (6-3) nisu dovoljno pouzdane da bi se mogla sa sigurnošću izračunati neka nepoznata vrijednost ekvivalentne koncentracije, vršne koncentracije ili vremena razrjeđenja. Međutim te jednadžbe mogu pokazati trend, tj. način na koji nepromjenive varijable (udaljenost ispusta ventilacijske cijevi, protok na ispustu ventilacijske cijevi i količina eksploziva) djeluju na promjenjive (vršnu koncentraciju, ekvivalentnu koncentraciju i vrijeme razrjeđenja). Nepouzdanost se javlja zbog velikih razlika u izmjerenim podacima na pojedinim tunelima i pojedinim probojima čela tunela. Podaci su prilično raspršeni, što je jedan od razloga nepouzdanosti jednadžbi. Također, postoji mogućnost netočnosti pojedinih podataka. Na primjer protok vremenski ne koincidira s miniranjem, a količina eksploziva je dobivena kao informacija. Još jedan razlog nepouzdanosti je eventualno postojanje drugih utjecajnih čimbenika koji u ovom radu nisu uzimani u obzir.

#### 6.4.1. Eksploziv kao čimbenik u koncentraciji plinova

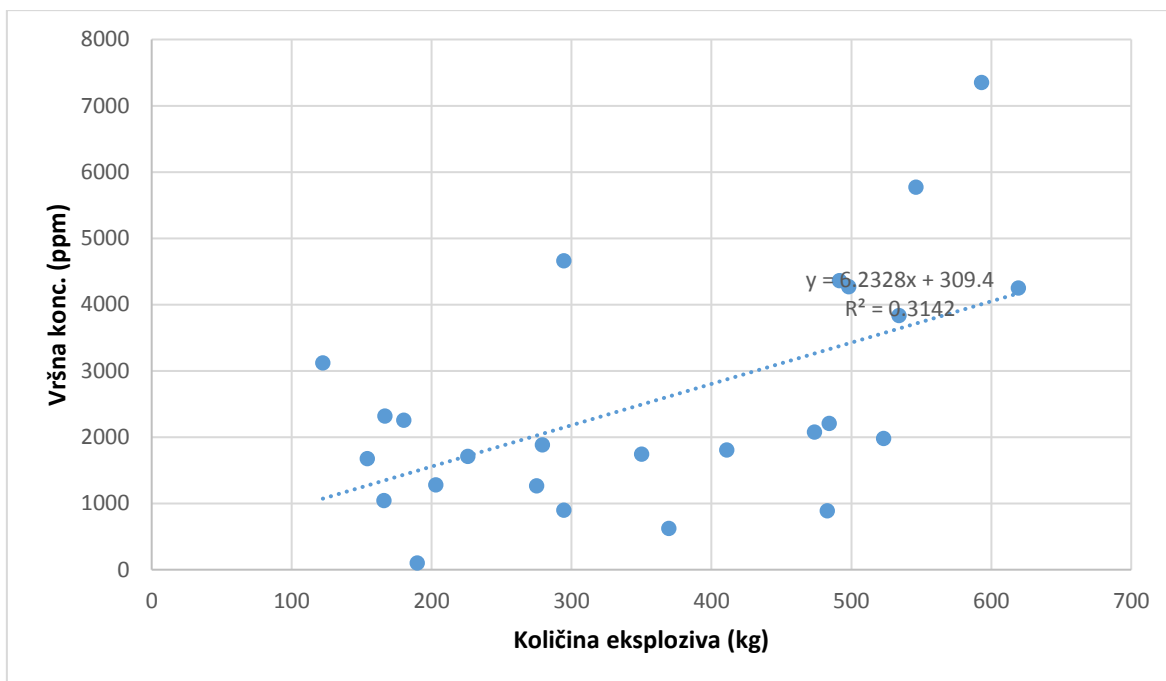
Dijagram na slici 6-6 prikazuje odnos između količine eksploziva i sumarne ekvivalentne koncentracije svih štetnih plinova. Na dijagramu se uočava prilična raspršenost podataka. Usprkos činjenici da su podaci raspršeni, metodom jednostavne linearne regresije, nađena je linearna veza odnosno jednadžba pravca. Budući da pravac raste, zaključuje se da je veza među podacima pozitivna. Specifičan pokazatelj reprezentativnosti linearne veze među podacima je koeficijent determinacije  $R^2$ . Što je njegova vrijednost bliže 1, model je reprezentativniji, tj. veza među podacima je jača. Kad

bi vrijednost  $R^2$  bila jednaka nuli, veza bi bila odsutna. Međutim u ovom slučaju koeficijent determinacije iznosi 0,212 što znači da veza ipak postoji.



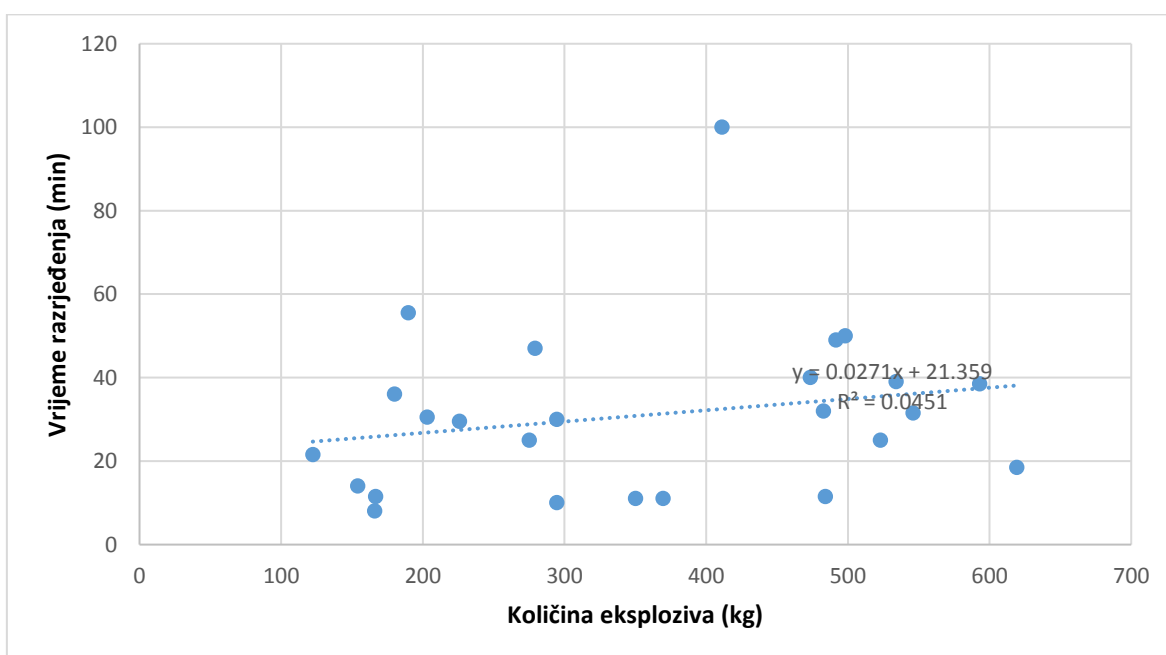
Slika 6-6. Dijagram ekvivalentna koncentracija – količina eksploziva

Dijagram koji opisuje korelaciju između količine eksploziva i ukupne vršne koncentracije plinova prikazan je na slici 6-7. Na temelju pravca zaključuje se da je veza između količine eksploziva i vršne koncentracije pozitivna linearna veza, a na temelju iznosa koeficijenta determinacije zaključuje se da je veza jača nego u prethodnom slučaju koji je prikazivao ovisnost količina eksploziva – ekvivalentna koncentracija.



Slika 6-7. Dijagram vršna koncentracija – količina eksploziva

Linearna veza između količine eksploziva i vremena razrjeđenja je dosta slaba u odnosu na prethodna dva slučaja. To potvrđuje dijagram na slici 6-8. Podaci su raspršeniji i dosta dostupaju od pravca, a koeficijent determinacije iznosi 0,045, što potvrđuje da je veza slaba. Takva je bila je početna pretpostavka, koja je potvrđena ovim dijagramom i jednadžbom pravca.

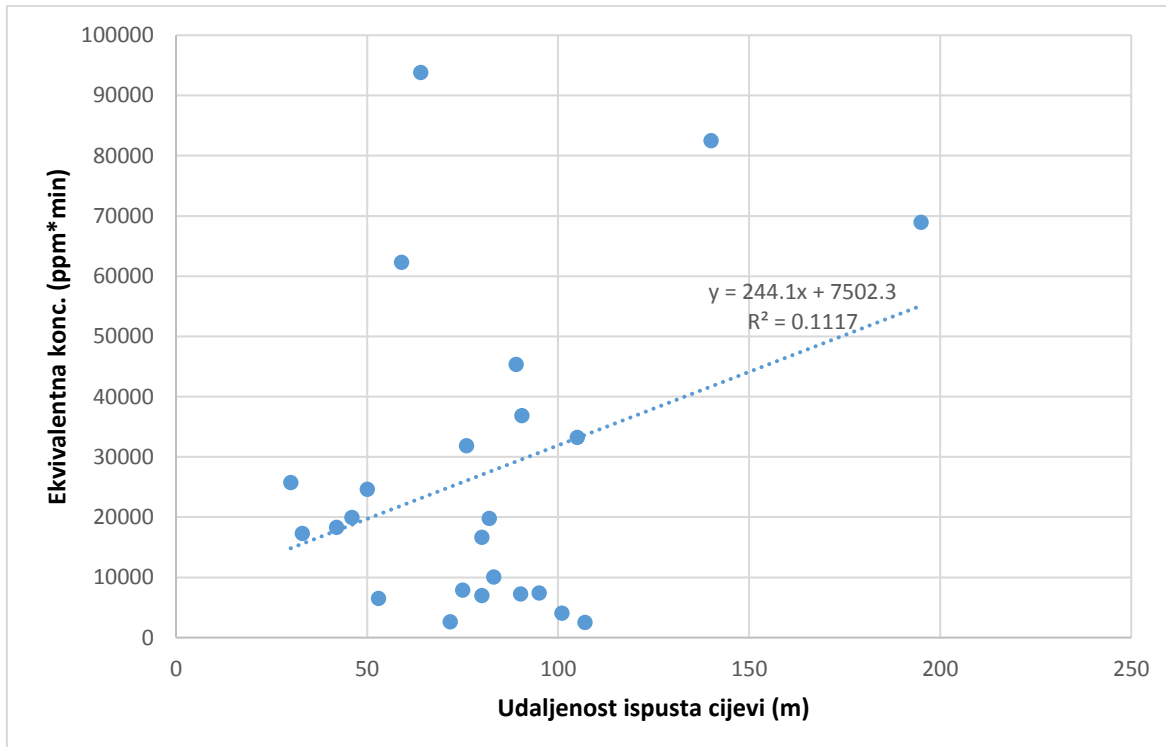


Slika 6-8. Dijagram vrijeme razrjeđenja – količina eksploziva

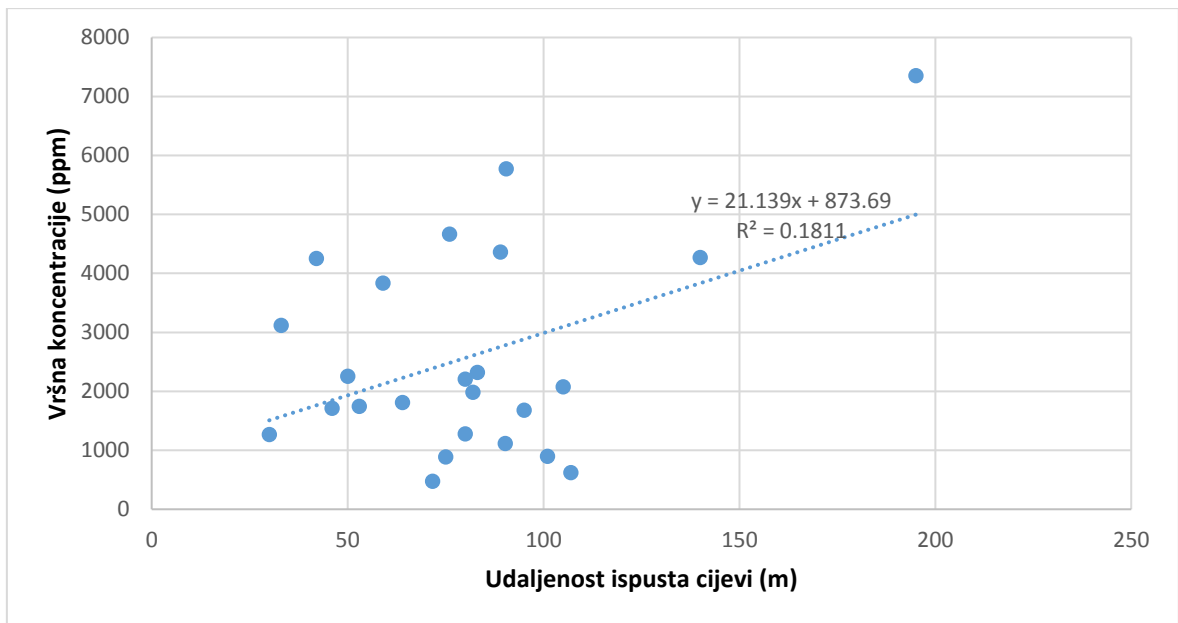
#### 6.4.2. Udaljenost cijevi kao čimbenik u koncentraciji plinova

Radi grafičkog prikazivanja podataka provesti će se jednostavne linearne regresije s jednom nezavisnom varijablom jer višestruku regresiju nije moguće prikazati.

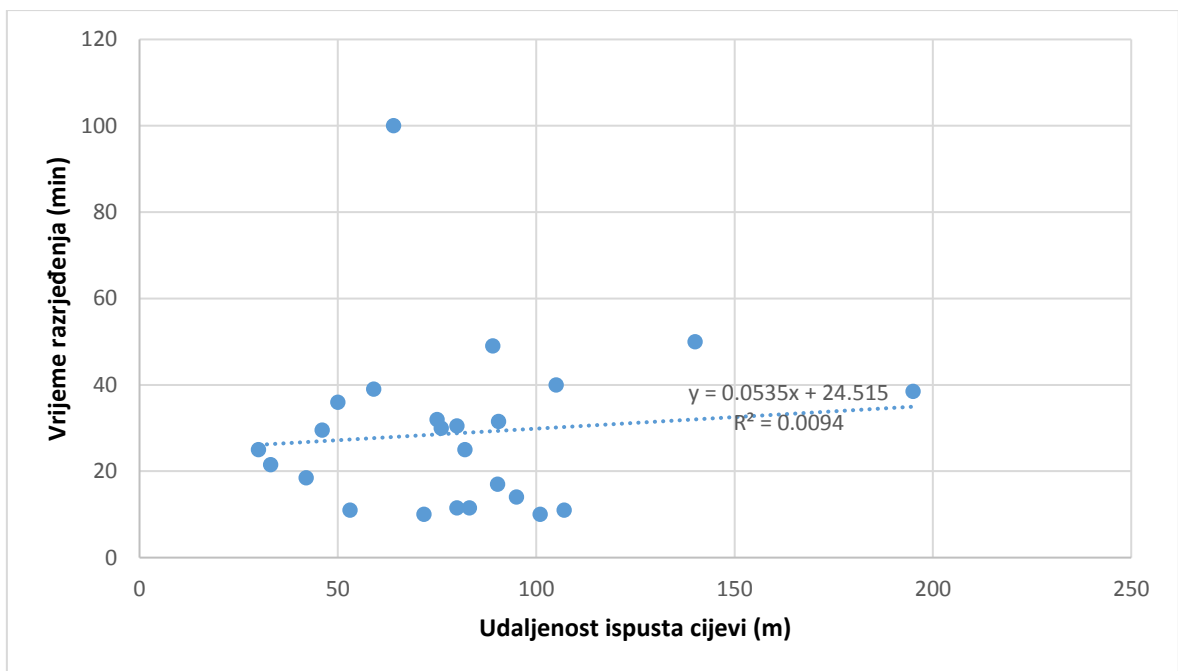
Dijagrami na slikama 6-9, 6-10 i 6-11 prikazuju linearnu ovisnost udaljenosti ispusta ventilacijske cijevi od čela i ekvivalentne koncentracije, vršne koncentracije i vremena razrjeđenja. Iako su koeficijenti derminacije u ovim slučajevima niski (0,111; 0,181; 0,009), što govori da linearna veza među podacima nije čvrsta, ipak se na temelju nagiba pravaca zaključuje da udaljenost cijevi ima određen utjecaj na promjenjive varijable. Na grafovima se može uočiti i nekoliko izmjerenih nepromjenjivih varijabli koje poprilično odskaču od ostalih vrijednosti pa je moguće da bi bez tih vrijednosti veze među podacima bile jače. U svakom slučaju, dijagrami na slikama 6-9, 6-10 i 6-11. dokaz su da postoji trend dužeg zadržavanja vala štetnih plinova s povećanjem udaljenosti cijevi od čela. Ako bi se ta pojava promatrala sa praktične strane, sa sigurnošću se može tvrditi da udaljenost ima utjecaj na vrijeme razrjeđenja jer za određenu dobavnu količinu zraka, logično je da je potrebno puno više vremena za izmjenu zraka kada je ispust ventilacijske cijevi udaljeniji od čela radilišta.



Slika 6-9. Dijagram ekvivalentna koncentracija – udaljenost ispusta cijevi



Slika 6-10. Dijagram vršna koncentracija – udaljenost ispusta cijevi



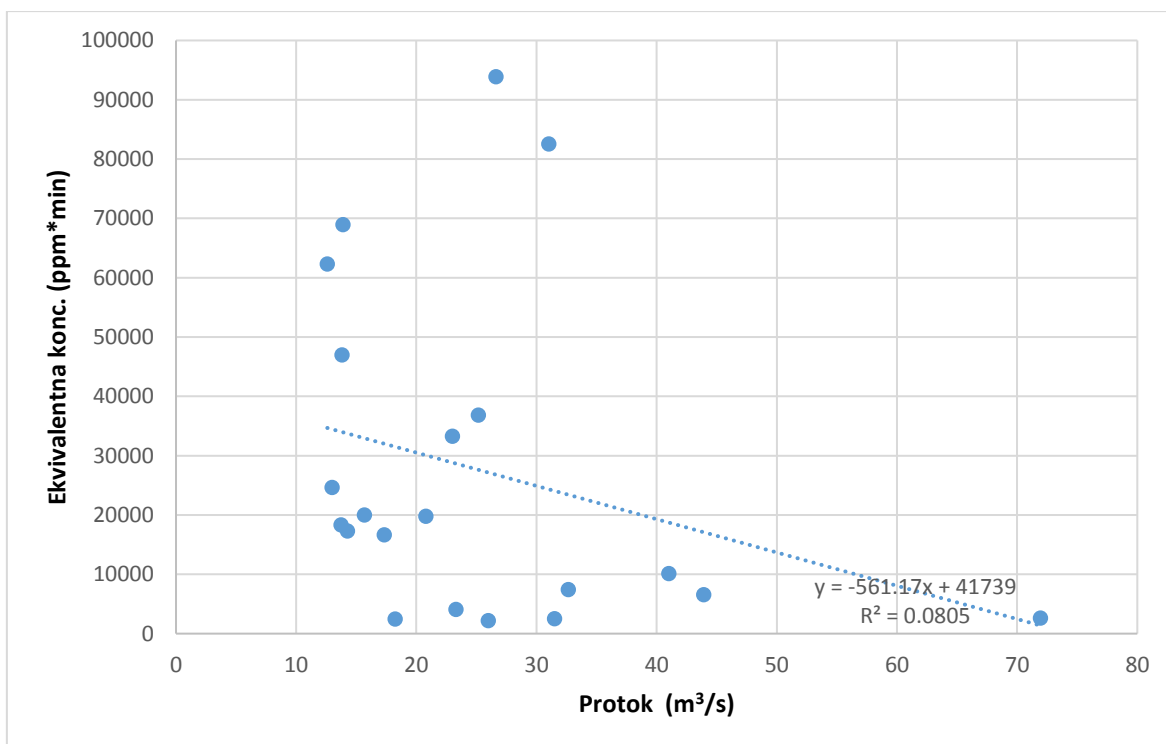
Slika 6-11. Dijagram vrijeme razrjeđenja – udaljenost ispusta cijevi

### 6.4.3. Protok zraka kao čimbenik u koncentraciji plinova

Cilj kod provjetravanja tunela je što prije razrijediti koncentracije štetnih plinova pa je za ostvarenje takvog cilja potrebno povećati protočne količine zraka. Na dijagramu na slici 6-12 pravcem je prikazana linearna veza među ekvivalentne koncentracije i protoka zraka. Pravac pokazuje pad, što bi bila negativna linearna veza među varijablama. Koeficijent

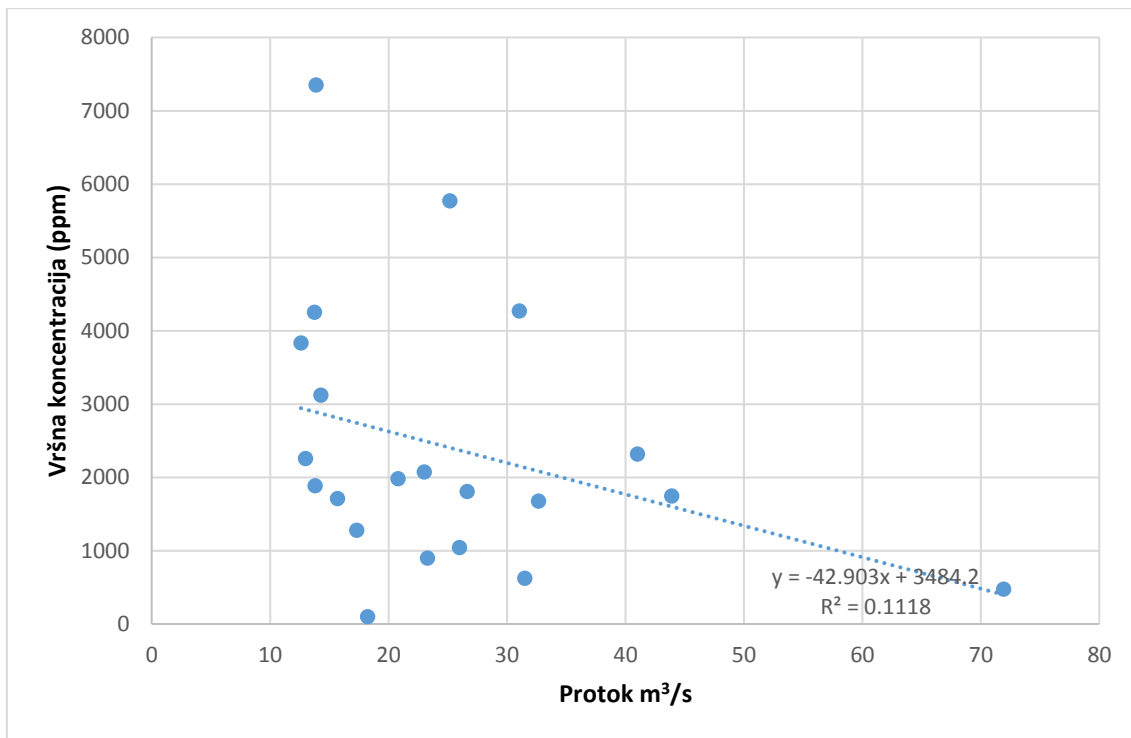


determinacije iznosi 0,080 što govori o da je veza među podacima slaba no na temelju nagiba pravca utvrđuje se da se povećanjem protoka smanjuju i vrijednosti ekvivalentne koncentracije.



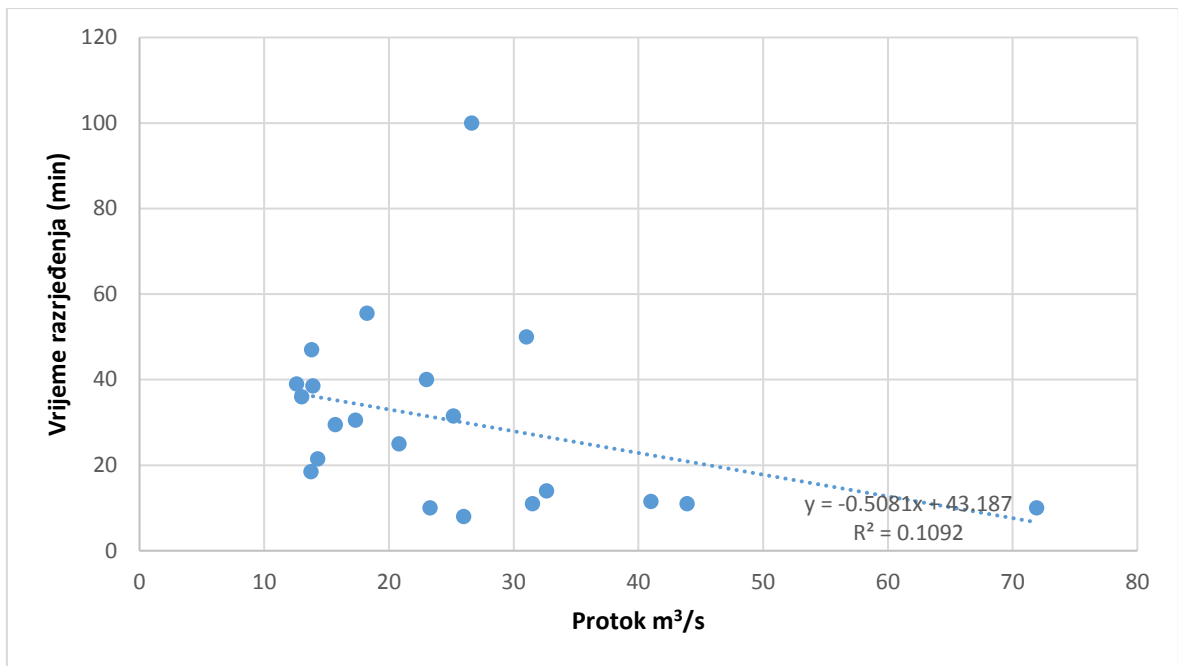
Slika 6-12. Dijagram ekvivalentna koncentracija – protok

Slično kao i u slučaju sa ekvivalentnom koncentracijom, vrijednosti vršne koncentracije pokazuju tendenciju smanjivanja što je vidljivo na dijagramu na slici 6-13. Sa većim protokom izmjerene vršne vrijednosti će biti manje. Nagib pravca je negativan, a to ide u prilog smanjenju vršne koncentracije kako se protok povećava.



**Slika 6-13.** Dijagram vršna koncentracija – protok

Dijagram na slici 6-14 prikazuje odnos protoka i vremena razrjeđenja. Prema nagibu pravca vidljivo je da je veza između varijabli negativna linearna. Veći protok će brže istjerati val plinova prema izlazu tunela, što je i bilo pretpostavljeno. Koeficijent determinacije iznosi 0,109.



Slika 6-14. Dijagram vrijeme razrjeđenja – protok

## 7. ZAKLJUČAK

Analizom podataka utvrđeno je da su količina eksploziva, udaljenost ispusta ventilacijske cijevi od čela tunela i dobavna količina zraka na izlazu ventilacijske cijevi parametri koji utječu na koncentracije štetnih plinova na radilištu tunela nakon izvedenog miniranja.

Modelom višestruke regresijske analize utvrđeno je da količina eksploziva ima najznačajniji utjecaj na količinu plinova oslobođenih miniranjem. Drugim riječima, sa povećanjem količine eksploziva rastu izmjerene vrijednosti ekvivalente i vršne koncentracije. Na vrijeme razrjeđenja količina eksploziva ima manji utjecaj od udaljenosti ventilacijske cijevi i protoka zraka na izlazu iz ventilacijske cijevi.

Iako je statističkom obradom utvrđeno da udaljenost cijevi ima manji utjecaj na povećanje ekvivalentne koncentracije, vršne koncentracije i vremena razrjeđenja štetnih plinova, parametar udaljenosti cijevi od čela tunela nije zanemariv. Između udaljenosti cijevi i promjenjivih varijabli (ekvivalentne koncentracije, vršne koncentracije, vremena razrjeđenja) postoji pozitivna linearna veza, što znači da povećanjem udaljenosti cijevi rastu i ekvivalentna koncentracija, vršna koncentracija te vrijeme razrjeđenja. Veća udaljenost cijevi djeluje nepovoljno i u praksi bi trebalo težiti tome da ispušt ventilacijske cijevi prati napredak čela tunela.

Veći protok zraka na izlazu iz ventilacijske cijevi djeluje povoljno na razrjeđenje koncentracije štetnih plinova. Protok smanjuje ekvivalentnu i vršnu koncentraciju a najviše utjecaja ima na vrijeme razrjeđenja. Protok i vrijeme razrjeđenja su varijable među kojima postoji velika povezanost. Povećanje protoka će najznačajnije smanjiti koncentracije štetnih plinova na radilištu tunela.

## 8. LITERATURA

AUTOMATIKA. 2016. Senzori gasova. URL:<https://www.automatika.rs/baza-znanja/senzor/senzori-gasova.html> (11.12.2016.)

DRÄGER SAFETY, 2002. Uređaj Multiwarn II. URL: [http://www.a1supply.com/images/file/rev1\\_MultiWarn%20II\\_En.pdf](http://www.a1supply.com/images/file/rev1_MultiWarn%20II_En.pdf)(10.12.2016.)

GI GRUPA, 2002. Tunel Brinje. URL: [http://www.gin.hr/hr/projekti/svi-projekti/tunel-brinje-\(autocesta-zagreb---split\),51.html](http://www.gin.hr/hr/projekti/svi-projekti/tunel-brinje-(autocesta-zagreb---split),51.html) (5.12.2016.)

GI GRUPA, 2002. Tunel Plasina. URL: [http://www.gin.hr/hr/projekti/infrastruktura/tunel-plasina-\(autocesta-zagreb---split\),52.html](http://www.gin.hr/hr/projekti/infrastruktura/tunel-plasina-(autocesta-zagreb---split),52.html) (5.12.2016.)

Hrvatska enciklopedija. Pitot-Pradtlova cijev. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=48496> (11.12.2016.)

HUDEĆ, M., KOLIĆ, D., HUDEC, S., 2009. Tuneli – Iskop i primarna podgrada. Zagreb: Hrvatska udruga za betonsko inženjerstvo i tehnologiju gradnje.

JANKOVIĆ, B., VRKLJAN, D., 2008. Izvješća o ispitivanju kakvoće zraka i mikroklimatskih uvjeta u radnim prostorima radilišta tunela.

Zagreb: Laboratorij za ventilaciju, Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Neobjavljeno

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

KRSNIK J., 1989. Miniranje. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

MUSTAPIĆ I., 2012. Građenje cestovnih tunela s osvrtom na posebnosti pri izgradnji tunela Šubir na autocesti A1. Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

NARODNE NOVINE br. 92/93. Pravilnik o maksimalno dopustivim koncentracijama štetnih tvari u atmosferi radnih prostorija i prostora i o biološkim graničnim vrijednostima. Zagreb: Narodne novine d.d.

TEPLY, E., 1990. Rudnička ventilacija. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

VRKLJAN, D., 2007. Vjetrenje rudnika, tunela i podzemnih prostorija, interna skripta, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

VIADUKT, 2003. Tunel Brezik. URL: <http://www.viadukt.hr/tunel-brezik-autocesta-zagreb-split> (5.12. 2016.)

VIADUKT, 2006. Tunel Sleme. URL: <http://www.viadukt.hr/tunel-sleme-desna-cijev>(5.12.2016.)

VIADUKT, 2008. Tunel Škurinje II. URL: <http://www.viadukt.hr/tunel-skurinje-ii-zaobilaznica-grada-rijeke> (5.12.2016.)

VIADUKT, 1996. Tunel Tuhobić. URL: <http://www.viadukt.hr/tunel-tuhobic-autocesta-zagreb-rijeka> (5.12. 2016.)

VUJEVIĆ, B., 2012. Kakvoća zraka prilikom izrade tunela na riječkoj obilaznici. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

VUKIĆ M., 1978. Otrovní gasovi u procesu miniranja. Zagreb: Tehnička knjiga.