

Primljen / Received: 13.4.2022.

Ispravljen / Corrected: 28.7.2022.

Prihvaćen / Accepted: 12.8.2022.

Dostupno online / Available online: 10.12.2022.

Analiza kritične brzine zraka u požaru cestovnog tunela

Autori:



Mr.sc. **Ivan Kenda**, dipl.ing.prom.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Građevinsko-geodetski fakultet
ivan.kenda1@gmail.com

Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Jakob Likar**, dipl.ing.grad.
Sveučilište u Ljubljani, Slovenija
Prirodoslovno-tehnički fakultet
jakob.likar1@siol.net

Pregledni rad

Ivan Kenda, Jakob Likar

Analiza kritične brzine zraka u požaru cestovnog tunela

Analiza kritične brzine zraka provedena je pomoću numeričkog modela prilagođenog za istočnu cijev cestovnog tunela Kastelec u Sloveniji. Time je omogućeno ispitivanje učinkovitosti ventilatora koja je potrebna za održavanje odgovarajućih prometnih uvjeta i propisane sigurnosti u tunelu. Pri kritičnoj brzini strujanja zraka, odnosno pri brzini strujanja zraka nižoj od propisane, gdje se još uvijek može učinkovito kontrolirati širenje dima kako bi se osiguralo potrebno vrijeme za sigurnu evakuaciju putnika iz požarom ugrožene cijevi tunela, posebna je pozornost posvećena fenomenima povratnog strujanja dima i slojevitog širenja dima ispod stropa tunela (tzv. "stratifikacija"). Provedene su simulacije uzdužnog ventilacijskog sustava s odsisima u jednoj točki.

Ključne riječi:

cestovni tunel, požar, ventilacija, kritična brzina zraka, povratno strujanje dima, stratifikacija

Subject review

Ivan Kenda, Jakob Likar

Analysis of critical air velocity in a road tunnel fire

A critical air velocity analysis was performed using a numerical model adapted for the eastern tunnel tube of the Kastelec road tunnel in Slovenia. This allowed the efficiency of the fans to be tested, which is required to maintain appropriate traffic conditions and prescribed safety in the tunnel. At the critical air velocity, that is, at an air velocity lower than the prescribed one, where the spread of smoke can still be effectively controlled to ensure time for a safe evacuation of passengers from a fire-endangered tunnel tube, special attention was paid to the phenomena of smoke backlayering and layered spread of smoke under the tunnel ceiling (so-called "stratification"). Simulations of the longitudinal ventilation system with single point extractions were conducted.

Key words:

road tunnel, fire, ventilation, critical air velocity, smoke backlayering, stratification

1. Uvod

Određivanje kritične brzine zraka pri uzdužnoj ventilaciji cestovnih tunela temeljan je, ali izazovan znanstveni problem. Ono je nužno kako bi se spriječilo stvaranje turbulencije ili brzo miješanje svježeg hladnog zraka s vrućim dimom u slučaju požara u cestovnom tunelu. Prilikom izbijanja požara u tunelu uz nedostatak svježeg zraka stvaraju se velike količine dima koji onemogućuje vidljivost i mogućnost kretanja vozila i ljudi. Postoji snažno strujanje dimnih plinova koji se kreću u svim smjerovima. Ako je strujanje zraka sporo, sloj dima će se dugo zadržati ispod stropa, omogućujući evakuaciju sudionika u prometu duž unaprijed određenih putova do sigurnog područja. Stručnjaci različito tumače mogućnosti reakcije u slučaju povratnog strujanja zraka u tunelskoj cijevi. Neki preporučuju trenutačnu prisilnu ventilaciju tunela, što često dovodi do brzog oslobađanja dima, a time se skraćuje vrijeme evakuacije. Dim se sporije spušta prema kolniku kada nema ventilacije. Posljednjih godina u ovom je području proveden velik broj istraživanja kako bi se došlo što bliže konkretnoj primjeni složenih numeričkih metoda za simulaciju određivanja graničnih brzina zraka pri uzdužnom provjetranju cestovnih tunela.

Yan i sur. [1] uz pomoć numeričkih analiza ispitali su mogućnost kontrole dima u slučaju požara u tunelu. Uz temperaturu i dim u obzir su uzeli minimalnu vidljivost i koncentraciju ugljičnog monoksida (CO) za simulaciju triju scenarija požara s 5 MW, 20 MW i 50 MW za različita mjesta požara. Tu su ključne dimenzije otvora za odsis dima, kao i brzina dima. Rezultati su pokazali da je veličina svijetlog poprečnog presjeka tunelske cijevi bitan parametar i da je odsisni otvor okomit na uzdužnu os tunela prikladniji za kontrolu dima, posebno u područjima udaljenima od izvora požara. To je povezano s brzinom odvođenja dima tako da viša razina odvođenja povećava učinkovitost kontrole dima unutar tunela.

Nadalje, Tang i sur. [2] iskoristili su Froudeov zakon sličnosti za razvoj modela malog tunela (mjerilo 1/14) i istraživanje kritičnih brzina zraka u tunelima. Proveden je niz eksperimenata kako bi se ispitala kritična brzina zraka pod različitim eksperimentalnim uvjetima mijenjanjem brzine oslobađanja topline požara (tzv. snage požara), temperature okoline, te radnog tlaka i rasporeda mlaznica. Ispitivanjem je analiziran utjecaj stabilnih sustava za gašenje požara s vodenom maglom na iznos kritične brzine strujanja zraka. Ispitivanja bez raspršivanja vode pokazala su da temperatura okoline gotovo nema utjecaja na kritičnu brzinu zraka. Također je provedena bezdimenzijska analiza za razvoj nove korelacije za predviđanje kritičnih brzina zraka u tunelu koji nema stabilni sustav za gašenje požara temeljen na raspršivanju vode. Točnost korelacije uspoređena je s rezultatima ispitivanja, kao i ispitivanjima koja su objavili drugi istraživači. Nakon analize 60 ispitivanja s vodenom maglom, otkriveno je da se kritična brzina zraka znatno smanjuje kada se aktivira vodena mlaznica. Maksimalno smanjenje kritične brzine bilo je približno 31% nominalne vrijednosti. Nadalje, otkriveno je da smanjenje kritične brzine zraka uvelike ovisi o broju, položajima i radnim

tlakovima vode u mlaznicama. Efekt hlađenja uslijed dodira kapljica vode u vodenoj magli s vrućim dimnim plinom nipošto nije jedini važan mehanizam, ali je ključan za smanjenje kritične brzine zraka uzrokovane vodenom maglom.

Chen i sur. [3] opsežno su istraživali učinak toplinskog uzgona, koji uzrokuje povratni tok dima generiranog požarom u tunelu i izuzetno je štetan za učinkovitu evakuaciju ljudi. U istraživanju se obrađuje utjecaj udaljenosti odvoda (otvora) u stropu i izvora topline na duljinu stratificiranog sloja dima ispod stropa u tunelu, u kombinaciji s učinkom uzdužne ventilacije. Eksperimenti su provedeni u tunelskoj cijevi smanjenog volumena sljedećih dimenzija: duljina = 72 m, širina = 1,5 m i visina = 1,3 m. Za stalni izvor topline korišten je porozni plinski plamenik. Njegova relativna udaljenost od stropnog odvoda (otvora) bila je različita. Otkriveno je da kako se udaljenost između izvora topline i stropa povećava, tako raste i toplinski tok zraka, koji omogućuje da dim može izlaziti van. Novi model teoretski je razvijen za predviđanje duljine povratnog strujanja dima, uzimajući u obzir faktor odvođenja topline (otvora) i gubitak energije zbog odvođenja dima, izračunan na temelju procjene lokalnog uzdužnog temperaturnog profila. Također je otkriveno da se predviđanja predloženog modela dobro slažu s eksperimentalnim rezultatima.

Prikazano je nekoliko primjera analize požara u cestovnim tunelima kako bi se pokazala važnost ove vrste analize koja izravno i neizravno utječe na pravilno odabrane scenarije za različite požare u cestovnim tunelima.

2. Jednadžbe za određivanje kritične brzine zraka

Prema preporukama PIARC-a [4], u slučaju požara brzine zraka u jednosmjernom tunelu moraju dostizati do 1,50 m/s, po mogućnosti u pozitivnom smjeru. Utvrđeno je da je to prosječna brzina strujanja zraka prije izbijanja požara. Kada požar započne, brzina na mjestu požara značajno se povećava zbog kontinuiteta, tj. zbog stvaranja dima. Budući da je prosječna brzina obično niža od kritične, često postoji povratno strujanje dima. Simulacije su otkrile da povratno strujanje dima ne predstavlja probleme pri brzinama zraka do 3,00 m/s jer je dim još uvijek u povratnoj (negativnoj) zoni ispod stropa tijekom početnih faza spašavanja. Kada se ventilatori uključe, sav dim (i prije i nakon mjesta požara) počinje se kretati prema izlazu, odnosno u pozitivnom smjeru, a stratificirani slojevi dima postupno se raslojavaju. U slučaju požara najnepovoljnija brzina je 3,00 do 6,00 m/s. Intenzivno kretanje zraka pri većim brzinama smanjuje temperaturu izgaranja.

Do sada je za računanje kritične brzine tunela uglavnom korišten skup jednadžbi izvedenih iz očuvanja Froudeovog broja u kombinaciji s eksperimentalnim podacima. Froudeov broj definiran je kao omjer inercijske i gravitacijske sile, izraz (1):

$$F_r = \frac{v^2}{g \times D} \times \left(\frac{T_f - T_0}{T_f} \right) \quad (1)$$

Thomas i drugi [5] iskoristili su tehniku očuvanja Froudeovog broja kako bi proučili učinak ventilacije na širenje požara u podzemnim tunelima i kako bi objasnili opći koncept kritične brzine zraka u tunelu, pod pretpostavkom da je Froudeov broj isti.

Kritična brzina zraka u istraživanju je definirana kao uzdužna brzina potrebna za uklanjanje povratnog sloja vrućih dimnih plinova. U tablici 1. navedene su najčešće korištene jednadžbe (modeli) za izračun kritične brzine zraka koje su rezultat istraživanja i razvijene su iz najosnovnijih oblika:

1) Danziger i Kennedy (R_{ic}):

$$v_{crit} = \left(\frac{gHQ}{\rho c_p AT_0 R_{ic}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

Danziger i Kennedy predstavili su formule za izračunavanje kritične brzine zraka u odnosu na brzinu prijenosa topline koristeći se SES metodom simulacije (eng. *Subway Environmental Simulation* - SES) 1982. godine, [6, 7].

Kennedy je razvio izraz za kritičnu brzinu, koja je iste godine primijenjena u projektu Metro, ekološkoj simulaciji Ministarstva prometa SAD-a.

2) Thomas i Froude (T_f):

$$v_{crit} = K_g K \left(\frac{gHQ}{\rho c_p AT_f} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p AV_{crit}} + T_0 \tag{4}$$

Thomas je prvi izračunao omjer kritične brzine zraka i snage požara koristeći se Froudeovim brojem. Thomas je predstavio

kritični Froudeov broj za predviđanje kritične brzine, prema [5]. Kada je kritični Froudeov broj postavljen na 1, fenomen povratnog sloja je nestao i dobiven je model predviđanja kritične brzine zraka.

3) Froude (prema Kennedyju) (F_{rm}), [4]:

$$v_{crit} = \left(\frac{gHQ}{\rho c_p AT_f F_{rm}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{5}$$

$$T_f = \frac{Qc}{\rho c_p AV_{crit}} + T \tag{6}$$

$$F_{rm} = 4,5 \times \left(1 + 0,0374 \times |\min(\text{grade}, 0)|^{0,8} \right)^{-3} \tag{7}$$

Ovaj model objašnjava svojstva protoka dima u tunelu pod ograničenim brojem pretpostavki, prema [6]. Kasnije su Danziger i Kennedy predložili poboljšani model s Froudeovim brojem 4,5.

4) Kennedy (Ken):

U tunelima gdje je strujanje zraka usmjereno prema dolje (nagib) zbog hladnijeg svježeg zraka, kritična brzina zraka može biti veća od one izračunane izrazom (2). Kennedy je uveo novu formulu za kritičnu brzinu zraka koja kombinira porast temperature vrućih plinova s konvektivnom snagom požara [8], i to:

U slučaju nagiba (npr. -2 %), za vožnju nizbrdo:

$$K_n = K_g = 1 + 0,0374 \cdot (\text{nagib})^{0,8} \tag{8}$$

Ako nema nagiba (nagib kolnika je nula) ili za uspon pri vožnju uzbrdo, $K_n = K_g = 1,00$

Prihvaća se da je:

$$v_{crit} = K_g K_1 \left(\frac{gHQ}{\rho c_p AT_f} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{9}$$

Tablica 1. Pogreške u proračunima v_{crit} temeljenim na jednadžbi pri snazi požara od 30 MW

Vatra	Tlak bure	T	Dim ε	Protok Q	v_{crit} [m/s], izrazi (2), (3), (5) i (9)					Ric/IDA	T_f /IDA	F_{rm} /IDA	Ken/IDA
					Ric	T_f	F_{rm}	Ken	IDA				
MW	Pa	°C	1/m	m ³	Ric	T_f	F_{rm}	Ken	IDA	Ric	T_f	F_{rm}	Ken
30	100	159,17	34,40	144,5	2,220	2,188	2,219	2,321	2,208	0,54	-0,009	0,49	5,11
V_{zrak}	200*	204,10	45,75	-135,82	2,145	2,065	2,147	2,071	2,208	-2,81	-6,47	-2,76	-6,20
	300	106,29	23,11	-258,78	2,316	2,229	2,318	2,230	2,208	4,89	0,95	5,02	0,99
	400	81,63	17,17	-338,69	2,370	2,280	2,371	2,280	2,207	7,38	3,30	7,43	3,30
	500	69,37	14,20	-401,92	2,400	2,306	2,399	2,310	2,207	8,74	4,48	8,69	4,66
	600	61,73	12,34	-456,07	2,419	2,320	2,417	2,330	2,207	9,60	5,12	9,51	5,57
	700	56,41	11,05	-504,18	2,430	2,337	2,430	2,340	2,206	10,15	5,93	10,15	6,07
	800	52,44	10,09	-547,80	2,440	2,346	2,440	2,350	2,206	10,60	6,34	10,60	6,52
	900	49,33	9,33	-588,19	2,448	2,353	2,447	2,361	2,206	10,97	6,66	10,92	7,02
	1000	46,83	8,72	-625,67	2,455	2,359	2,454	2,367	2,206	11,28	6,93	11,24	7,29

* snažne promjene

Godine 1996. rezultati ispitivanja požara u Memorijalnom tunelu u Sjedinjenim Američkim Državama [9] otkrili su da je prognoza kritične brzine primjenom izraza (5) bila 5-15 % veća, što smo također dokazali usporedbom izračuna pomoću izraza (2), (3), (5) i (9) s rezultatima simulacije u tablici 1.

2.1. Kennedyjeva jednadžba

Kennedyjeva jednadžba korištena je za izračun minimalne konstantne brzine dovoda zraka usmjerenog prema požaru koja je potrebna za uklanjanje dima i sprječavanje povratnog strujanja. Kennedyjeva jednadžba je točna, a procjena je realistična, kao što pokazuju simulacije, odnosno numerička metoda. Kennedy je razvio formulu kritične brzine 1982. godine:

$$V_c = K_g k \left(\frac{gHQ}{\rho c_p AT_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p AVc} + T_0 \quad (11)$$

Pretpostavljena je određena normalizacija u brzini oslobađanja topline u odnosu na duljinu požara duž tunela. U skladu s tim, vjerojatno je da će Kennedyjeva jednadžba i dalje biti najbolja metoda za procjenu kritične brzine za projektiranje cestovnog tunela u bliskoj budućnosti (bez prilagođenog CFD-a).

Ovisno o veličini i intenzitetu požara, karakteristikama i brzini izgaranja, interakciji zraka i vatre te geometriji tunela, možda će biti potrebne promjene u načinu izračuna temperature dima na mjestu požara. Simulacije i izračuni pokazuju da je kritična brzina u slučaju požara obično između 2,20 i 2,40 m/s.

3. Metode istraživanja

Analizom računalnih programa otkriveno je da iako postoji mnogo različitih programa, većina njih je nepotpuna. Program IDA-RTV zasad se pokazao najpospešnijim. Program IDA RTV uključuje numeričke metode za različite scenarije.

Taj program omogućuje analizu protoka zraka u cestovnom tunelu u odnosu na emisije vozila s ciljem izračuna koncentracije svake štetne komponente u tunelu: CO, NO_x, dim i čađa. Može se proučavati ventilacija u redovnim i požarnim uvjetima uporabe. Nadalje, može se proučavati uzdužna, polupoprečna i poprečna ventilacija, s mogućnošću jednosmjernog ili dvosmjernog prometa. Također je moguće proučavati dinamiku prometa [10], kao što su redoviti prometni tokovi, zagušenja i prometne gužve. Program IDA RTV uključuje niz dodatnih opcija, kao što su analiza veza i ogranaka, analiza prigušenja zvuka, dimenzioniranje tunela s polupoprečnom ili poprečnom ventilacijom, kompozitni tuneli itd. Sadrži skup podataka o ventilatorima i odlično je prilagođen za analizu stanja tunela, simulaciju, evaluaciju i validaciju [11, 12].

Rezultati simulacije pokazuju tlak i temperaturu zraka, volumen i protok zraka te koncentracije štetnih tvari duž tunelske cijevi. Ulazni podaci su geometrija tunelske cijevi, otpori protoka zraka, gustoća i omjer (sastav) vozila u prometu, kvaliteta ili emisija vozila te hidrometeorološki podaci na mjestu tunela.

U istočnoj cijevi tunela Kastelec provedene su simulacije različitih veličina. Tunelska cijev ima dva prometna traka u smjeru Kopar – Ljubljana.

U analizi podataka dobivenih računalnom simulacijom korišteni su različiti podaci i parametri, no posebno se promatrala kritična brzina zraka u tunelu, koja ovisi o brzini puhanja bure. Također je izračunana kritična brzina pri različitim uvjetima i vrijednostima. Kako bi se to utvrdilo, istovremeno su uspoređene različite jednadžbe. Rezultati su prikazani u tablicama 2. i 3..

Kako bi se potvrdili parametri pomoću Kennedyjeve jednadžbe u različitim uvjetima, provedene su simulacije. Ti uvjeti uključuju promjene temperature, koncentraciju dima (vidljivost), otrovne plinove (CO, NO_x), brzine zraka i posljedični fenomen povratnog strujanja dima te promjene tlaka.

Simulacijama programom IDA RTV (tablica 2.) obuhvaćene su različite vrijednosti ulaznog protutlaka bure, od 0 do 500 Pa, s različitim brojem uključenih ventilatora (12 ili 14), pri različitim brzinama i potisku ventilatora, pri različitoj snazi požara (30 ili 40 MW, što predstavlja zapaljenje kamiona ili autobusa), različite duljine požara (5 ili 10 m) te različite lokacije požara (600 ili 1000 m).

Kao što se vidi u tablici 2., kritična vrijednost brzine ostaje na 2,208 m/s unatoč varijacijama u broju ventilatora, brzinama ventilatora i udaljenosti između požara i ulaza. U usporedbi s protutlakom bure od 200, 250 i 300 Pa, brzina zraka koji ulazi u cijev tunela ($V_{ulaz\ zrak}$) mijenja se i pada s 4,426 m/s na –6,126 m/s uz promjenu predznaka brzine strujanja zraka na –0,0131 m/s. Pri protutlaku vjetra od 250 Pa, 14 impulsnih ventilatora i klipni učinak vozila u prometu, koja se kreću brzinom od 50 km/h, preokreću smjer strujanja zraka. Sve veća brzina bure mijenja smjer strujanja zraka i stvara opasno područje, posebice tijekom spašavanja.

Stoga je potrebno osigurati odgovarajuće uvjete, uzimajući u obzir brzinu vjetra i rad ventilatora, kako bi se osigurali takvi uvjeti (stratifikacija dima) i kako bi se osiguralo da ne dolazi do (pretjeranog) miješanja svježeg zraka i dima u požaru. To znači da vrući dimni plinovi trebaju ostati ispod stropa što je dulje moguće, omogućujući većini sudionika da se sigurno povuku u susjednu (zapadnu) tunelsku cijev.

Tablica 3. prikazuje parametre CO, NO₂, i zamućenost dima pri različitim protutlakovima bure koja djeluje na ulazu, sektoru tunela (dakle, na cijeloj cijevi) i izlazu iz tunela. Program izdaje upozorenje na opasnost u slučaju protutlakova vjetra od 250 i 300 Pa kada je snaga požara 40 MW, a duljina 10 m. U tom slučaju nemoguće je postići dopuštene kritične vrijednosti navedenih parametara.

Kada brzina vjetra prijeđe 30 m/s, operater zatvara tunel!

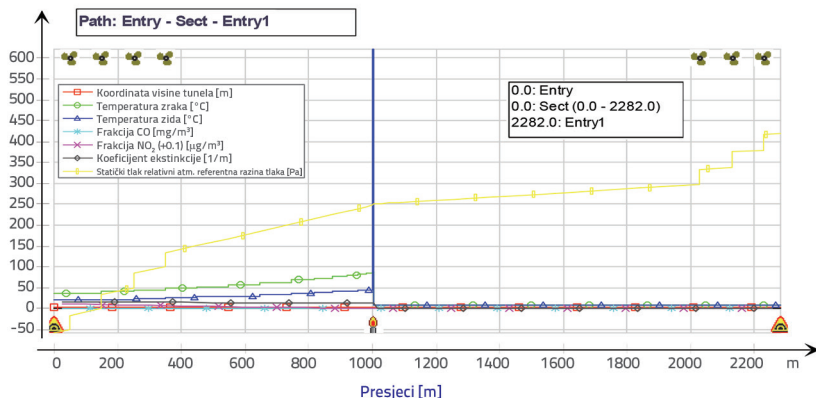
Tablica 2. Simulacije različitih požarnih snaga i brzina vjetra u tunelskoj cijevi uz program IDA RTV

POŽAR	Jedinica	Bura4	Zagušenje6	Bura3	Zagušenje6	Zagušenje1	Zagušenje3	Bura2	Zagušenje0	Zagušenje	Zagušenje5	Bura5	Bura	Bura 1	Zagušenje4	
Duljina požara	m	5	5	5	10	10	5	5	10	10	10	5	5	5	10	
Ventilacija	-	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	uzdužna	
Brzina vozila	km/h	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
V_{bura}	Pa	0	100	200	250	300	300	320	400	400	410	500	500	500	500	
ventilatori	n	12	12	14	14	14	14	14	14	14	12	12	14	14	14	
Lokacija požara	m	600	600	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	600	
$V_{ventilatori}$	m/s	30	30	35	30	30	35	35	30	30	30	30	30	35	30	
Impulсни ventilator	kW	437,2	438,7	494,6	486,5	486,6	499,3	569,3	444,5	440,4	379,80	422,7	494,6	559,3	381,9	
$P_{****pad}$	Pa/MWW	0,1	0,1	0,1	4,0	4,0	0,1	0,1	4,0	4,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
uzgon ventilator	N/kW	30	30	36	30	30	35	36	30	30	30	30	30	36	30	
T_{zrak}	°C	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
$T_{stijenka maks.}$	°C	626,60	644,10	646,2	604	1685	2295	683,5	598,80	578,9	544,20	706,7	621,20	628,80	451,60	
$P_{1 ulaz}$	Pa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$P_{2 izlaz}$	Pa	0	100	200	250	300	300	320	400	400	410	500	500	500	500	
ventilatori*	n	12 F+PE-B	12 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	12 F+PE-B	12 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	14 F+PE-B	
$P_{I(Atm)}$	Pa	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	-57,45	
$P_{d(Atm)}$	Pa	-57,45	42,55	142,5	192,5	242,5	242,5	262,5	342,5	342,5	352,5	442,5	442,5	442,5	442,5	
P požara	MW	30	30	30	40	40	30	30	40	40	40	40	30	30	30	
$V_{ulaz zraka (PE)}$	m/s	4,426	2,838	2,674	-0,0131	-0,1293	-1,925	-1,307	-1,887	-2,445	-4,581	-5,275	-5,028	-4,205	-6,126	
$V_{izlaz zraka **}$	m/s	-4,426	-2,835	-2,669	0,01307	0,129	1,919	1,303	1,88	2,435	4,563	5,25	5,004	4,185	6,096	
V_{crit}	m/s	2,208	2,208	2,208	1,278	2,072	2,244	2,207	2,369	2,369	2,37	2,369	2,207	2,207	2,207	
Q_{lijevo}	m³/s	252,3	161,8	152,4	-0,7467	-7,373	-132,1	-78,38	-120,5	-158,9	-300	-337,2	-313,3	-262,8	-398,8	
Q_{desno}	m³/s	-264,2	-168	-162,4	0,7448	7,351	109,4	74,28	107,2	138,8	260,1	299,3	285,4	238,7	347,6	
smjer	kapacitet do 3900 vozila, gustoća prometa 103,10/km/traci								kapacitet do 4650 vozila, gustoća prometa 103,10/km/traci				kapacitet do 3900 vozila, gustoća 103,10/km/traci			
sastav***	1000 PC, 200 HGT, 40 HGT															
	Upozorenje: Nije dopušten promet od „Ulaz1“ do „Sekt“. Ulazni promet zanemaren.															
	Greška: Simulacija je prekinuta sa smanjenom brzinom oslobađanja topline požara. Ovo najvjerojatnije nije fizički valjan rezultat.															

Gdje je: *F-ventilator, PE-klipni učinak, B-bura; **Ignoriramo; ***PC-osobni automobili, HGV-kamioni, HGT-cisterne; ****Pad tlaka zbog požara [Pa/MW]

Tablica 3. Prikaz izračunanih graničnih vrijednosti za CO, NO₂ i zamućenost dima prema tablici 2.

POŽAR	Jedinica	Bura4	Zagušenje6	Bura3	zagušenje2	Zagušenje1	Bura2	Zagušenje0	Zagušenje	Zagušenje5	Bura5	Bura	Bura 1	Zagušenje4	
P požara	MW	30	30	30	40	40	30	40	40	40	40	30	30	30	
V_{bura}	Pa	0	100	200	250	300	320	400	400	410	500	500	500	500	
Ulaz u tunel:															
Zamućenost dima	m³/s	0	0	0	0,003587	40,04	5523	7780	7898	7916	7690	5579	5605	5878	
CO	mg/s	0	0	0	48,08	489,9	512,1	1365	1391	1785	544,7	527,2	529,5	1352	
NO ₂	µg/s	0	0	0	1470	14839	38062	40723	41487	417557	40489	39183	39359	522192	
Tunelska cijev - sektor:															
Zamućenost dima	m³/s	19,67	30,71	32,61	763	598,6	69,21	62,26	47,7	25,34	22,00	17,31	20,71	14,2	
CO	mg/s	1,053	1,643	2,958	70,17	67,8	6,322	10,77	8,284	5,657	1,536	1,612	1928	3,222	
NO ₂	µg/s	78,26	122,1	219,9	2085	2038	469,9	321,4	247,1	1335	114,2	119,8	143,3	1260	
Izlaz iz tunela:															
Zamućenost dima	m³/s	5280	5232	5473	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CO	mg/s	282,7	279,9	496,5	0	0	0	0	0	-352,2	0	0	0	-438	
NO ₂	µg/s	21010	20803	36902	0	0	0	0	0	-313715	0	0	0	-419157	

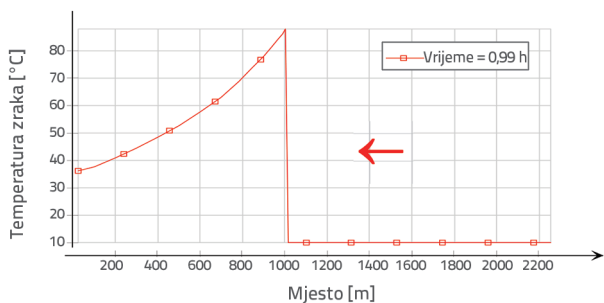


Slika 1. Istočna cijev, uzdužna ventilacija, požar 1000 m, 14 ventilatora, uvjeti na 500 Pa

3.1. Analiza i simulacije

Slika 1. grafički prikazuje visinski tijek rute, distribuciju statičkog tlaka, distribuciju koncentracije CO i NO₂, distribuciju vidljivosti (ekstinkcije) te distribuciju temperature zraka i površinske temperature zida-obloge (simulacija bure, tablica 2). U simulaciji je požarna snaga 30 MW, lokacija požara je 1000 m od ulaznog otvora, uključeni su svi ventilatori, nominalna snaga je 30 kW, a protutlak bure je 500 Pa. Dužina cijevi istočnog tunela L = 2278 m. Vrijeme simulacije je t = 1 h. Nema efekta klipa.

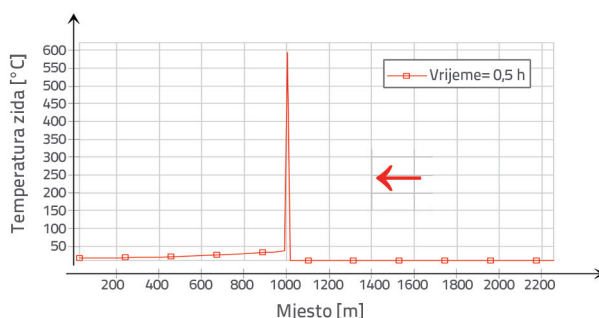
Na slici 2. prikazana je temperatura zraka, T_{zrak}. Vidljivo je da na primarnoj strani, na udaljenosti između ulaza u cijev tunela i požara, dolazi do porasta temperature preko 90 °C, kao posljedica povratnog toka pretjerano jake bure. Udar vrlo jake bure osjeti se i u području iza požarišta jer se temperatura zraka gotovo odmah spusti na 10 °C. U oluji ovog intenziteta, tunel se mora odmah zatvoriti! Snaga požara je 30 MW.



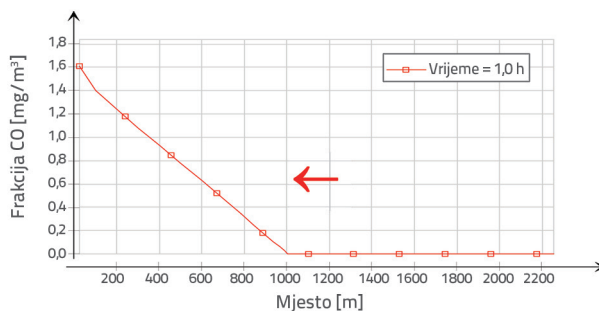
Slika 2. Prikaz temperature zraka u tunelskoj cijevi na poziciji L = 2278 m

Iz prikaza temperature stijenke na slici 3. vidljivo je da ona značajno raste u neposrednom području požara, L = 1000 m. Može doseći i do 600 °C. Zbog jake bure, stijenke tunelske cijevi brže se hlade i na primarnoj i na sekundarnoj strani. Snaga požara je 30 MW.

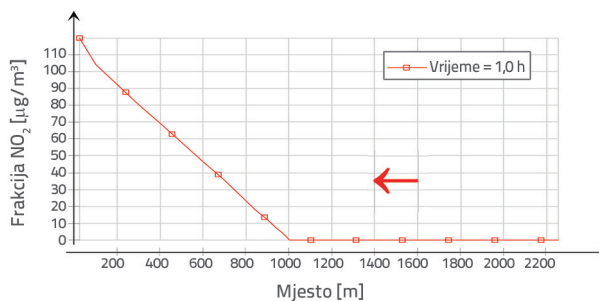
Slika 4. prikazuje distribuciju koncentracije CO u tunelskoj cijevi na duljini od L = 2278 m. Bura uzrokuje povratni tok CO. Na primarnoj strani vidljive su povećane razine CO u smjeru od požara prema ulazu u tunel. Svi ventilatori su uključeni. Budući



Slika 3. Prikaz temperature stijenke u tunelskoj cijevi na poziciji L = 1000 m



Slika 4. Prikaz vrijednosti CO u tunelskoj cijevi na poziciji L = 2278 m



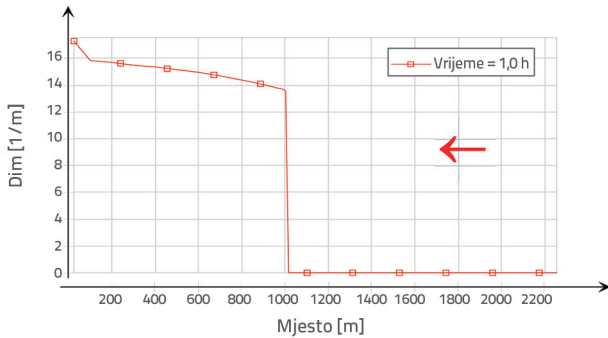
Slika 5. Prikaz vrijednosti NO₂ u tunelskoj cijevi na poziciji L = 2278 m

Slika 6. prikazuje raspodjelu dima (ekstinkcije) u tunelskoj cijevi. Budući da je bura jača od ventilatora, vrijednost je povećana u dijelu koji prethodi požaru. Dim se vraća do ulaza u tunel. Povratni tok dima.

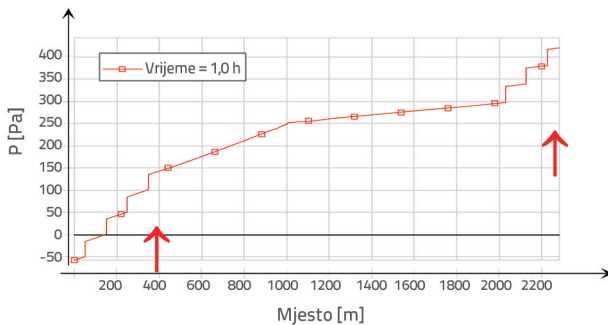
da je bura jača, tunel se mora odmah zatvoriti.

Slika 5. prikazuje distribuciju koncentracije NO₂ u tunelskoj cijevi na duljini od L = 2278 m. Zbog prejake bure, NO₂ putuje u istom smjeru kao i CO, od požara do ulaza u tunel. Povratni tok NO₂. Svi su ventilatori uključeni. Bura je snažnija od ventilatora.

Slika 7. prikazuje distribuciju tlaka u tunelskoj cijevi na duljini od L = 2278 m. U blizini ventilatora tlak značajno raste. Svi su ventilatori uključeni. Tlak raste u području iza požara, L = 1000 m.

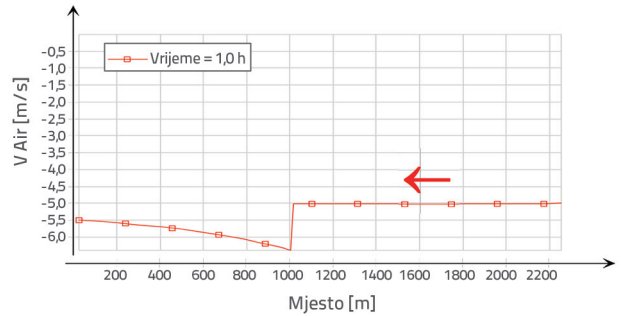


Slika 6. Prikaz vrijednosti vidljivosti (ekstinkcije) u tunelskoj cijevi na poziciji L = 2278 m



Slika 7. Prikaz tlaka u tunelskoj cijevi na poziciji L = 2278 m

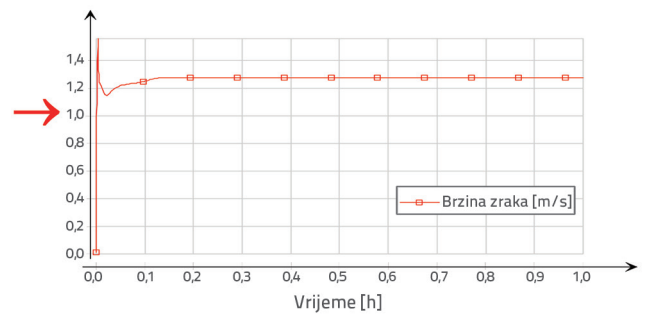
Slika 8. prikazuje distribuciju brzine zraka u istočnoj cijevi tunela na duljini od L = 2278 m. Zbog jake bure brzina zraka ima negativan predznak i okrenuta je u suprotnom smjeru od smjera vožnje.



Slika 8. Prikaz brzine zraka u tunelskoj cijevi na poziciji L = 2278 m

Slika 9 uključuje:

- 14 uključenih ventilatora, što dovodi do povećane potrošnje energije
- duljina požara je 10 m
- temperatura stijenki nije bitno viša, a kritična brzina zraka je premla: 1,278 m/s
- POŽAR je snage 40 MW, svi su ventilatori uključeni, a protutlak bure je 250 Pa, bura je jača
- duljina istočne cijevi tunela je L = 2278 m.

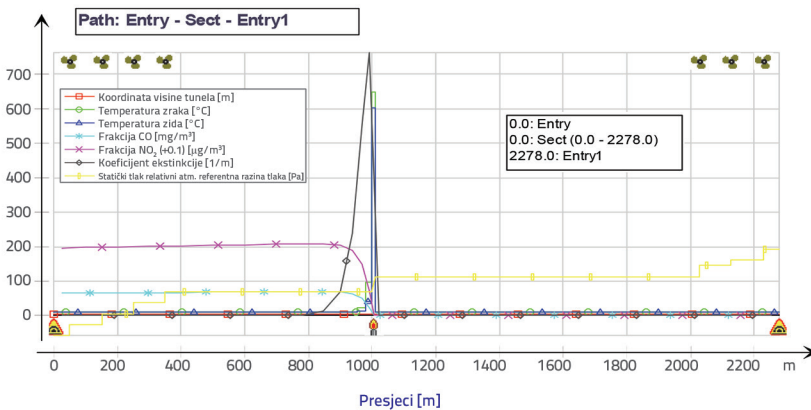


Slika 10. Prikaz brzine zraka u tunelskoj cijevi u vremenu t = 1 sat

Slika 10. prikazuje protok zraka u tunelskoj cijevi s 14 ventilatora koji rade jedan sat. Kao što se može vidjeti iz slike, unutar dodijeljenih 180 sekundi, dostignuta brzina zraka NIJE veća od propisane kritične brzine od 1,50 m/s. Postoji realna mogućnost kretanja dima unatrag.

4. Zaključak

Cilj je ovog istraživanja proučavanje kritične brzine zraka u cijevi tunela i njene korelacije s raspodjelom tlaka bure unutar tunela. Kako bi se spriječilo širenje vatre i dima u smjeru suprotnom od smjera vožnje, ventilatori moraju raditi u skladu sa RVS smjernicama i postići prosječnu brzinu zraka od najmanje



Slika 9. Istočna cijev, uzdužna ventilacija, požar 40 MW, 14 ventilatora, uvjeti na 250 Pa

1,5 m/s u poprečnom presjeku tunelske cijevi, uzimajući u obzir očuvanje slojevitog širenja dima (tzv. stratifikacija). Zbog kontrolirane ventilacije, vanjski zrak ne smije utjecati na brzo hlađenje nastalih dimnih plinova (održava se stratifikacija), što dovodi do djelomičnog povratnog protoka dimnih plinova. U ovom radu provedena su parametarska istraživanja utjecaja bure, jakog vjetra promjenjivih smjerova i intenziteta, koji značajno utječe na ventilaciju, pogotovo kada djeluje suprotno od smjera prometa. Snaga požara ima značajan utjecaj na kritičnu brzinu zraka. Za određivanje kritične brzine zraka u tunelskoj cijevi potrebno je uzeti u obzir uzdužni nagib tunelske cijevi kao i brojne druge parametre.

Kad bura puše u izlazni portal tunelske cijevi, protok zraka Q ima negativan predznak (-), raspodjela tlaka p ostaje konstantna, temperatura požara T raste, a duljina požara se smanjuje. Protok zraka Q ne raste pri istoj raspodjeli tlaka s povećanjem duljine požara. Brzina zraka suprotna je od kretanja vozila. Povećanjem duljine požara dolazi do pada temperature te se povećava količina dima. Na priloženim se slikama vidi da su u sekundarnoj zoni sve vrijednosti niske i konstantne kada bura puše iz Ljubljane u rasponu 250–500 Pa prema izlaznom otvoru istočne cijevi tunela Kastelec. Ako je protutlak bure viši od tlaka zraka koji proizvode ventilatori, štetni plinovi se vraćaju u cijev tunela umjesto da izlaze kroz njegov sjeverni otvor.

Nadalje, povećana brzina bure može otežati i odvođenje dimnih plinova iz tunela. Visoki tlakovi udara bure između 250 i 500 Pa uzrokuju preusmjeravanje strujanja zraka u suprotnom smjeru (-) od smjera vožnje. Dakle, čak i ako nema požara u tunelu, i pri nižoj raspodjeli tlakova, od 200 Pa i više, ako se pritom javljaju jaki udari bure, u skladu s RVS propisima tunelsku cijev treba zatvoriti!

U slučaju požara najnepovoljnija brzina strujanja zraka je 3,00 do 6,00 m/s. Pri nižim brzinama dolazi do manjeg, ali ne i opasnog, povratnog kretanja dima, no pri većim brzinama intenzivno kretanje zraka snižava temperaturu izgaranja te se dim spušta prema tlu. U usporedbi s preporukama PIARC-a u slučaju požarnih opterećenja, potrebna je brzina kretanja zraka u tunelu do 1,50 m/s, po mogućnosti u pozitivnom smjeru. U slučaju požara, brzina zraka značajno se povećava zbog stvaranja dima na mjestu požara (zbog kontinuiteta protoka). Budući da je prosječna brzina općenito niža od kritične brzine, obično dolazi do povratnog strujanja dima. Autori istraživanja svjesni su da je pojava brzine zraka koja je suprotna od smjera vožnje unutar tunelske cijevi suprotna općeprihvaćenim principima rada ventilacije u slučaju požara. Međutim, autori smatraju da ovo pitanje, posebno u slučaju utjecaja jakih vjetrova na sustav ventilacije tunela, zahtijeva daljnju raspravu i istraživanje.

LITERATURA

- [1] Yan, Z., Zhang, Y., Guo, Q., Zhu H., Shen, Y., Guo, Q.: Numerical study on the smoke control using point extraction strategy in a large cross-section tunnel in fire, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82 (2018), pp. 454–467.
- [2] Tang, Z., Liu, Y.J., Yuan, J.P., Fang, Z.: Study of the critical velocity in tunnels with longitudinal ventilation and spray systems, *Fire Safety Journal*, 90 (2017), pp. 139–147.
- [3] Chen, L.F., Hu, L.H., Zhang, X.L., Zhang, X.Z., Zhang, X.C., Yang, L.Z.: Thermal buoyant smoke back-layering flow length in a longitudinal ventilated tunnel with ceiling extraction at difference distance from heat source, *Applied Thermal Engineering*, 78 (2015), pp. 129–135.
- [4] PIARC, Fire and smoke control in road tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels, C5, ITA, 2003.
- [5] Hong, P.G., Yi, Z.Q.: Review of Research on Critical Velocity in Tunnel Fire, *International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment*, E3S Web of Conferences, 79 (2019) E3S Web Conf.
- [6] Brahim, K., Mourad, B., Afif, E.C., Lettm B.A.: Control of Smoke Flow in a Tunnel, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 6 (2013) 1, pp. 49–60.
- [7] Tarada, F.: New Perspectives on the Critical Velocity for Smoke Control, *Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Report ISTSS SP, Frankfurt am Main, pp. 420–426, 2010.
- [8] Kennedy, W.D.: Critical Velocity, Past, Present and Future, *One Day Seminar on Smoke and Critical Velocity in Tunnels*, ITC, 2 (1996).
- [9] Santoianni, D.A., Gonzales, J.A.: Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP), test, results and conclusions, *TRIS*, American Public Transportation Association, 3 (1996), pp. 157–159.
- [10] Modic, J.: Model predora in simulacija prezračevanja v primeru požara, *Strojniški vestnik*, 49 (2003) 9, pp. 458–468.
- [11] Modic, J.: Cestni predori v teoriji in praksi, *Priročnik za projektante in izvajalce*, učbenik za študente. Ljubljana, DARS, 2021.
- [12] Cheng, J., Liu, F., Shi, Y., Shi, C., Qi, C., Borowski, M., Zhang, Y.: Model tests of fire smoke control effects in highway tunnels, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 9, pp. 781–792, <https://doi.org/10.14256/JCE.2671.2019>