

Primljen / Received: 16.3.2019.

Ispravljen / Corrected: 22.8.2019.

Prihvaćen / Accepted: 28.9.2019.

Dostupno online / Available online: 10.10.2020.

Modelska ispitivanja utjecaja na kontrolu požarnog dima u cestovnim tunelima

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Jianwei Cheng**
jchengwvu@gmail.com
 Autor za korespondenciju



¹**Fangyuan Liu**, dipl.ing.grad.
1328449857@qq.com



¹**Yu Shi**, dipl.ing.grad.
470884956@qq.com



²Prof.dr.sc. **Congling Shi**
shicl@chinasafety.ac.cn



¹**Chang Qi**, dipl.ing.grad.
1195363965@qq.com



³Prof.dr.sc. **Marek Borowski**
borowski@agh.edu.pl



⁴Prof.dr.sc. **Yongjun Zhang**
583425105@qq.com

¹Kinesko sveučilište za rudarstvo i tehnologiju, Kina
 Glavni laboratorij za kontrolu plinova i požara
 u rudnicima ugljena

²Kineska akademija znanosti i tehnologije u području
 sigurnosti, Kina
 Glavni laboratorij u Bejingu za požare u podzemnim
 željeznicama i sigurnost putnika u prometu

³Sveučilište znanosti i tehnologije AGH, Poljska
 Fakultet rudarstva/AGH

⁴Sveučilište za tehnologiju Qingdao
 Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Jianwei Cheng, Fangyuan Liu, Yu Shi, Congling Shi, Chang Qi, Marek Borowski, Yongjun Zhang

Modelska ispitivanja utjecaja na kontrolu požarnog dima u cestovnim tunelima

U radu je odabran tipičan tunel dužine 150 m te je izrađen njegov model u mjerilu 1:15 kako bi se ocijenili utjecaji na kontrolu dima. Na temelju Froudeovog kriterija sličnosti provedena su 32 modelska ispitivanja obrazaca širenja dima i uzdužne raspodjele temperatura. Rezultati pokazuju da na kontrolu dima utječu tri faktora i to brzina uzdužnog strujanja zraka, broj dimovodnih zaklopki i energija požara, pri čemu se smatra da na kontrolu dima najviše utječe brzina uzdužnog strujanja zraka.

Ključne riječi:

tunelski požar, ispitivanje na modelu, dim, raspodjela temperature, utjecaj na kontrolu

Research Paper

Jianwei Cheng, Fangyuan Liu, Yu Shi, Congling Shi, Chang Qi, Marek Borowski, Yongjun Zhang

Model tests of fire smoke control effects in highway tunnels

In this work, a typical tunnel 150 m in length is selected and modelled at a scale of 1:15 to assess its effects on smoke control. A total of 32 model tests on smoke flow pattern and longitudinal temperature distribution have been carried out based on the Froude similarity criterion. The results show that smoke control is affected by three factors, namely, the longitudinal airflow velocity, number of opened smoke-exhaust dampers, and fire power, out of which the longitudinal airflow velocity has the greatest effect on smoke control.

Key words:

tunnel fire, model test, smoke, temperature distribution, control effect

Vorherige Mitteilung

Jianwei Cheng, Fangyuan Liu, Yu Shi, Congling Shi, Chang Qi, Marek Borowski, Yongjun Zhang

Modellversuche zum Einfluss der Brandrauchbekämpfung in Straßentunneln

Ein typischer 150 m langer Tunnel wurde ausgewählt und ein Modell im Maßstab 1:15 entwickelt, um die Auswirkungen auf die Rauchkontrolle zu bewerten. Basierend auf dem Froude-Ähnlichkeitskriterium wurden 32 Modellversuche der Rauchausbreitungsmuster und der Temperaturverteilung in Längsrichtung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rauchkontrolle durch drei Faktoren beeinflusst wird, nämlich die Geschwindigkeit des Längsluftstroms, die Anzahl der Abgasventile zur Rauchableitung und die Brennenergie, wobei angesehen wird, dass die Rauchkontrolle am stärksten von der Geschwindigkeit des Längsluftstroms beeinflusst wird.

Schlüsselwörter:

Tunnelbrand, Modellprüfung, Rauch, Temperaturverteilung, Einfluss auf die Kontrolle

1. Uvod

U Kini se od osamdesetih godina prošlog stoljeća bilježi značajan porast gradnje cestovnih tunela, a taj je trend još uočljiviji u razdoblju od početka 21. stoljeća do današnjih dana. Statistički podaci pokazuju da Kina ima 16.229 cestovnih tunela ukupne dužine od 15.295,1 km, a od toga 3841 tunel ulazi u kategoriju dugačkih tunela (6599,3 km) dok se 902 tunela ubrajaju u kategoriju vrlo dugačkih tunela (4013,2 km) [1]. Pritom treba napomenuti da se dugačkim tunelima smatraju tuneli dužine od 1000 do 3000 m, a vrlo dugački su oni čija dužina prelazi 3000 m [2]. Kako broj, dužina i gustoća cestovnih tunela ubrzano raste, tako rastu i potencijalni rizici kojima su izloženi korisnici tunela, pri čemu se rizik pojave požara smatra najopasnijim [2-4]. Tunelski požari uzrokuju velik broj žrtava te goleme gospodarske gubitke ali se srećom ipak radi o relativno rijetkim pojavama [5-7]. Uzroci požara u cestovnim tunelima, iskazani prema postocima učestalosti, prikazani su na slici 1. [8]. Tunel je zapravo uzak i dugačak prostor s ograničenim brojem evakuacijskih izlaza. Zbog toga nakon izbijanja požara teško dolazi do raspršivanja dima [9-12]. Vrući dim u tunelu nije samo štetan za konstrukciju tunela, već može biti poguban i za korisnike tunela [13-17]. Pojava dima može također umanjiti vidljivost u tunelima, što često otežava evakuaciju i spašavanje korisnika [18-20].



Slika 1. Uzroci požara u cestovnim tunelima [8]

Mnogi istraživači u svojim radovima analiziraju faktore koji utječu na kontrolu dima u cestovnim tunelima. Tako su npr. Vauquelin i Megret [21] izradili model tunela u mjerilu 1:20 kako bi istražili na koji način oblik i položaj dimovodnih zaklopki utječe na kontrolu dima. Oni u zaključku navode da dimovodne zaklopke uopće ne utječu na odimljavanje kada su otvorene na vrhu tunela, te da im je učinak izbacivanja slab kada su otvorene na bočnim stijenkama tunela. Međutim, oni u svom radu nisu istražili uzdužni raspored dimovodnih zaklopki. Ingason i dr. [22] koriste model u mjerilu 1:23 kako bi istražili utjecaj brzine strujanja zraka u tunelu na sljedeće parametre: najviša temperatura dima, raspodjela temperatura i raslojavanje dima. Međutim, njihovim ispitivanjem nisu obuhvaćene dimne zaklopke. Xu i dr. [23] koriste numeričke simulacije u analizi brzine strujanja zraka za slučaj požara na centraliziranom sustavu zaklopke dima. Oni navode da se dim

može na jednostavan način izbaciti samo ako brzina protoka zraka induciranog požarom dostigne odgovarajuću vrijednost. Međutim, u njihovoj se studiji analizira samo jedna snaga požara. Wu i dr. [24] su analizirali utjecaj na kontrolu dima nekoliko parametara planinskog tunela koji je opremljen neovisnim sustavom za odimljavanje. Wu i dr. [25] izradili su model u mjerilu 1:10 za ispitivanje požara u tunelu te su na tom modelu istražili djelotvornost odvodnje topline centraliziranog načina odimljavanja. Razmatran je i utjecaj zaklopki za odimljavanje na učinkovitost odvodnje topline. Međutim, oni u svojoj analizi nisu uključili raspodjelu temperatura uzduž tunela. Yi i dr. [26] koriste model tunela u mjerilu 1:10 za analizu odimljavanja u postupku polupoprečne ventilacije. Njihovi rezultati pokazuju kako utjecaj polupoprečnog sustava ventilacije na izbacivanje dima ovisi o otvorenim dimovodnim zaklopkama, o njihovom razmaku, o površini svake zaklopke i o udaljenosti između dimovodnog otvora (smoke vent) i ventilatora (air blower). Međutim, u njihovom je istraživanju korištena samo jedna snaga požara. U opisanim istraživanjima provedene su numeričke simulacije ili modelska ispitivanja kako bi se ispitalo utjecaj brzine uzdužnog strujanja zraka, dimovodnih zaklopki i snage požara, na kontrolu dima. Međutim, cjelokupan utjecaj ta tri faktora analizira se u vrlo malom broju studija. U ovom se radu koristi model tunela u mjerilu 1:15 u analizi raspodjele temperatura i širenja dima duž tunela, kako bi se odredio odnos između ta tri faktora i njihov utjecaj na kontrolu dima u cestovnim tunelima.

2. Osnovni opis fizikalnog simulacijskog modela

2.1. Teoretska osnova

Kriterij sličnosti osnova je za modelska ispitivanja jer omogućuje postizanje pouzdanih rezultata. Za provedbu modelskog ispitivanja najprije treba odrediti način izrade modela te parametre koji će se koristiti u ispitivanju. U modelskom ispitivanju, strujanje fluida u modelu slično je strujanju koje se odvija u stvarnom tunelu. Zbog toga kinetika fluida u modelu treba odgovarati kinetici fluida u stvarnom tunelu. Drugim riječima, isti parametri gibanja, kao što su geometrijska, kinematička, energetska i toplinska sličnost, trebaju biti međusobno proporcionalni. Osim toga, i početni i granični uvjeti trebaju biti podudarni. Ipak, teško je tijekom ispitivanja utvrditi da li parametri modela odgovaraju parametrima stvarnog tunela. Na temelju karakteristika dosadašnjih požara u tunelima utvrđeno je da se Froudeov kriterij sličnosti može u praksi primijeniti za provođenje modelskih ispitivanja u kojima se određuje strujanje dima i način na koji se to strujanje može kontrolirati. S obzirom na to, donesena je odluka da se u ovom radu Froudeov broj (Fr) koristi kao osnova za rješavanje pitanja sličnosti.

Za potrebe ovog ispitivanja projektiran je izveden model u mjerilu 1:15. U skladu s Froudeovim kriterijem sličnosti, proporcionalni odnosi između parametara modela m i parametara stvarnog tunela p mogu se odrediti na sljedeći način:

Karakteristična veličina: $\frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{15}$ (1)

Temperatura: $T_m = T_p$ (2)

Volumen protoka: $\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 = \left(\frac{1}{15}\right)^2$ (3)

Energija na izvoru požara: $\frac{Q_m}{Q_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 = \left(\frac{1}{15}\right)^2$ (4)

Brzina: $\frac{v_m}{v_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{15}\right)^{\frac{1}{2}}$ (5)

Vrijeme: $\frac{t_m}{t_p} = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{15}\right)^{\frac{1}{2}}$ (6)

gdje je:

- T - temperatura [°C]
- L - veličina elementa [m]
- V - volumen protoka [m³/s]
- Q - energija požara [kW]
- v - brzina [m/s]
- t - vrijeme [s].

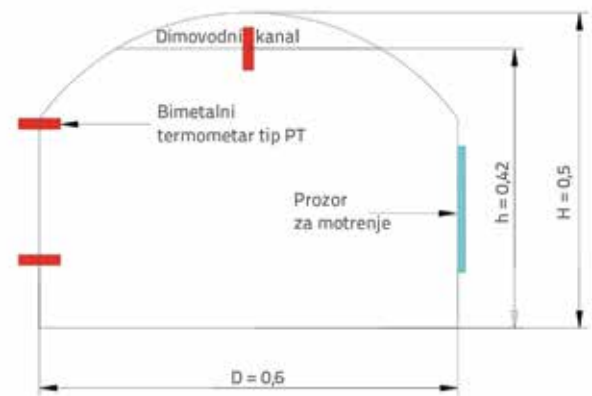
2.2. Model tunela

Model koji se koristi u ovom radu izrađen je prema stvarnom tunelu Caihongling koji se nalazi u širem području grada Jiangmen u kineskoj pokrajini Guangdong. Dužina stvarnog tunela je 5 068 km, visina mu je 6,2 m a širina 9,5 m. Za potrebe ovog istraživanja odabrana je tipična dionica dužine 150 m. Zatim je izrađen model te dionice u mjerilu 1:15, slika 2. Model se sastoji od deset segmenata izrađenih od pocinčanog lima, slika 3. Dimenzije pojedinačnih segmenata su 1 m (dužina) x 0,6 m (širina) x 0,4 m (visina), slika 4. Model je položen na horizontalnu podlogu. Na segmentima od broja 2 do broja 9 na obje strane izvedeni prozori kako bi se mogao promatrati požar u tunelu. U ispitivanju su predviđena četiri slučaja s obzirom na otvaranje dimovodnih zaklopki: 0 (bez otvaranja), 1 (otvorena prva zaklopka), 2 (otvorena

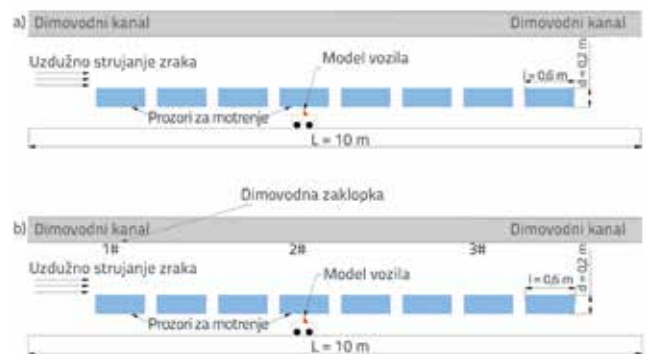
druga zaklopka) i 3 (otvorena treća zaklopka). Dimovodne zaklopke otvarane su prema shemi definiranoj za svaki od ta četiri slučaja (slike 5.a i 5.b).



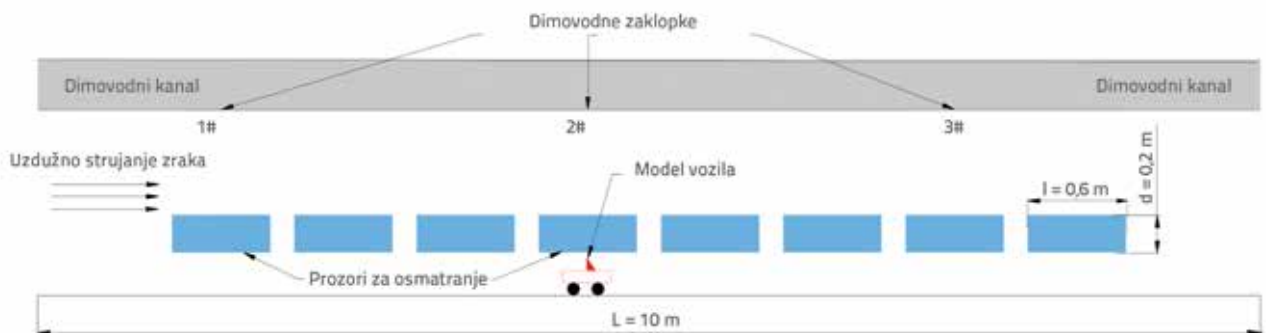
Slika 3. Model tunela



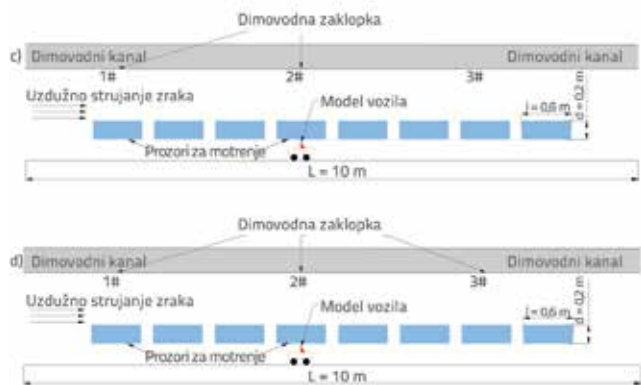
Slika 4. Poprečni presjek modela tunela



Slika 5a. Uzdužni segmenti tunela s različitim brojem dimovodnih zaklopki: a) bez otvaranja; b) Otvorena prva zaklopka



Slika 2. Uzdužni presjek modela tunela



Slika 5b. Uzdužni segmenti tunela s različitim brojem dimovodnih zaklopki: c) Otvorena druga zaklopka; d) Otvorena treća zaklopka

2.3. Izvor požara

U ovom je ispitivanju korišten kerozin kao "izvor požara", tj. kao sredstvo za simuliranje požara u modelu tunela. U okviru ispitivanja, u čeličnu posudu dimenzija 0,15 m (dužina) x 0,12 m (širina) x 0,018 m² (površina) stavlja se kerozin i malo papira koji služi za generiranje dima. U posudi se nalaze tri utora za ulje, a površina svakog utora iznosi 0,018 m². Takav raspored omogućuje primjenu različitih energija požara mijenjanjem količine goriva i zona gorenja. Snaga požara za različite modele vozila definirane su prema normi PIARC (Stalna međunarodna udruga cestovnih kongresa) [30], kao što je to prikazano u tablici 1.

Tunelima najviše prometuju osobna vozila i kamioni. Stoga je u ovom ispitivanju snaga požara definirana za osobne automobile i kamione. U eksperimentu su precizno projektirane geometrijske dimenzije modela zapaljenog vozila. Dimenzije modela vozila iznose 0,15 m (dužina) x 0,12 m (širina) x 0,018 m² (površina). Dio vozila koji se puni gorivom podijeljen je na tri spremnika pojedinačnog kapaciteta 0,006 m³. Ispuštanje toplote podešava se zadavanjem količine goriva (etanola) i mijenjanjem zone u kojoj se odvija proces gorenja. Prema kriteriju sličnosti Fr, snaga

požara modela vozila postavlja se na 17,2 kW (što odgovara vrijednosti od 15 MW u stvarnom požaru) za osobna vozila, tj. na 22 kW (što odgovara vrijednosti od 20 MW u stvarnom požaru) za autobuse. Kao što se vidi u tablici 1, projektirani požar od 15 MW u tunelu temelji se na pretpostavci pojave požara u jednom vozilu, tj. u više vozila koja sudjeluju u sudaru. Energija požara podijeljena je u dvije kategorije: A i B. Kategorija A: kerozin se stavlja u dva uljna utora; svaki utora sadrži 20 ml goriva i 10 g drvnog materijala; snaga požara iznosi otprilike 22 kW (slika 6.).



Slika 6. Paljenje modela vozila

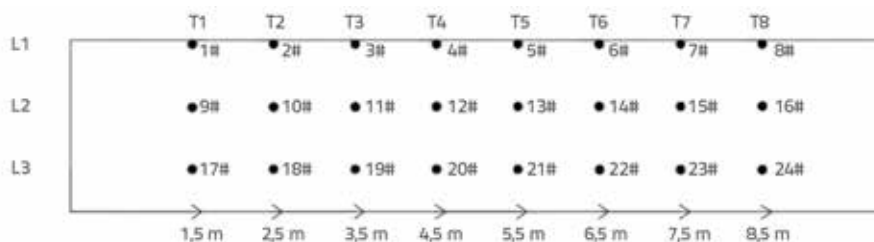
2.4. Ventilator i sustav za pohranjivanje podataka

U ispitivanju se za generiranje uzdužnog strujanja zraka koristi niskošumni cijevni ventilator tipa SFG koji se odlikuje tihim radom. Ventilator je opremljen regulatorom za podešavanje brzine strujanja zraka. Prema podacima iz Propisa za projektiranje cestovnih tunela (JTG D70/2-2014), za jednosmjerne se tunele preporučuje brzina uzdužnog ventiliranja u rasponu od 2,5 m/s (prema [31]) do 12 m/s (prema [28]). Treba se predvidjeti mogućnost reguliranja brzine strujanja zraka s točnošću od 0 ≈ 1 m/s. U ovom su ispitivanju korištene četiri brzine: 0 m/s, 0,3 m/s (što odgovara brzini od 1,16 m/s u stvarnim uvjetima), 0,6 m/s (što odgovara brzini od 2,32 m/s u stvarnim uvjetima) i 0,9 m/s (što odgovara brzini od 3,48 m/s u stvarnim uvjetima).

U ispitivanju se podaci prikupljaju svake četiri sekunde i za to se koristi automatski sustav za prikupljanje podataka opremljen visokopreciznim višekanalnim instrumentom za kontrolu temperature (tip: Applent, model: WT-500). Na horizontalne segmente L1 i L2 montirani su bimetalni termoparovi tipa K kojima se mjeri temperatura u rasponu od 0 °C do 1000 °C, a na horizontalnom segmentu L3 montiran je bimetalni termopar za

Tablica 1. Tipične vrijednosti maksimalnih brzina oslobađanja toplote (HRR) za različita cestovna vozila [30]

Model vozila	Osobno vozilo	Lako dostavno vozilo	Autobus	Kamion do 25 tona	Kamion od 25 do 30 tona	Cisterna za gorivo
Maksimalna vrijednost HRR, MW	5-10	15	20	30-50	70-150	200-300



Slika 7. Raspored točaka u kojima se mjeri temperatura

mjerjenje temperatura u rasponu od 0 °C do 500 °C. Oznaka T1 koristi se za vertikalni segment koji je od ulaza u tunel udaljen 1,5 m, a oznake T2, T3, T4, T5, T6, T7 i T8 predstavljaju vertikalne segmente koji su jedan od drugog udaljeni 1 m. L1 je oznaka za horizontalnu ravninu na vrhu tunela. L2 je horizontalna ravnina koja se nalazi 0,15 m niže od vrha tunela. L3 je horizontalna ravnina koja se nalazi 0,13 m iznad dna tunela. Zatim se mjeri temperatura u 24 međusegmenta unutar 8 vertikalnih segmenata i 3 horizontalne ravnine (slika 7.).

2.5. Uvjeti ispitivanja

Provedena su ukupno 32 modelska ispitivanja u raznim uvjetima ispitivanja. Podaci o broju otvornih dimovodnih zaklopki, o brzini strujanja zraka te o snazi požara prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Uvjeti modelskih ispitivanja

Oznaka	Izvor požara [kW]	Broj dimovodnih zaklopki	Brzina ventiliranja [m/s]
A01	17,2	0	0; 0,3; 0,6; 0,9
A02	17,2	1	0; 0,3; 0,6; 0,9
A03	17,2	2	0; 0,3; 0,6; 0,9
A04	17,2	3	0; 0,3; 0,6; 0,9
B01	22	0	0; 0,3; 0,6; 0,9
B02	22	1	0; 0,3; 0,6; 0,9
B03	22	2	0; 0,3; 0,6; 0,9
B04	22	3	0; 0,3; 0,6; 0,9

2.6. Dimovodne zaklopke

U ovim se eksperimentima dimovodne zaklopke koriste za simuliranje odimljavanja nakon izbijanja požara. Na eksperimentalni model tunela postavljene su ukupno tri zaklopke. One se nalaze na 2,5 m, 4,5 m i 6,5 m računajući od ruba tunela (slika 2., od lijeve strane prema desnoj). Snaga zaklopke iznosi 0,09 kW, a brzina rotiranja je 1450 r/min, čime se postiže strujanje zraka od 100 m³/h. Dimenzije zaklopki definirane su u skladu s potrebama ventiliranja te iznose 0,1 m x 0,1 m.

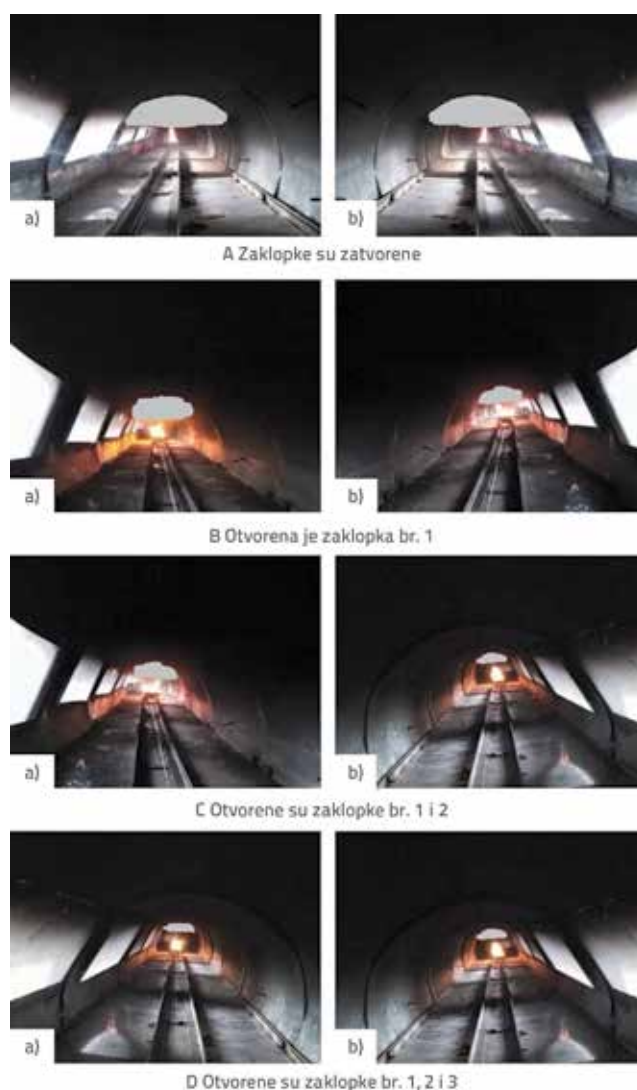
3. Rezultati ispitivanja i rasprava

3.1. Raspodjela dima u tunelu kada su dimovodne zaklopke otvorene, bez uzdužnog strujanja zraka

Kada nema uzdužnog protoka zraka, otvorene zaklopke uvelike utječu na raspodjelu i temperaturu dima u tunelu. Kada zaklopke nisu otvorene, oblak dima širi se simetrično a temperatura u tunelu raspoređuje se bočno, jednoliko i simetrično oko izvora. Osim toga, tunel je pun dima, što je vrlo nepovoljno za evakuaciju

korisnika i vozila, a ujedno onemogućuje ulazak spasilačkim ekipama u tunel.

Kada su zaklopke otvorene, nastaje razlika tlaka u tunelu, pa stoga dim postaje rjeđi i brže se širi prema zaklopkama, a u tunelu pritom dolazi do raslojavanja dima, što povoljno utječe na evakuaciju osoba i spašavanje. Kada je otvorena samo zaklopka br. 1, dim oko te zaklopke postaje rjeđi, ali se gustoća dima na drugoj strani bitno ne mijenja. Kada su otvorene zaklopke br. 1 i br. 2, tada se bitno smanjuje gustoća dima na obje strane, naročito u uzvodnom dijelu tunela nakon zaklopke br. 1. Kada su otvorene zaklopke 1, 2 i 3, još više se poboljšava izbacivanje dima koji postaje vrlo rijedak, pa se tako bitno smanjuje opasnost za osobe i njihova vozila. Raspodjela dima u tunelu ovisno o broju otvorenih zaklopki prikazana je na slici 8.



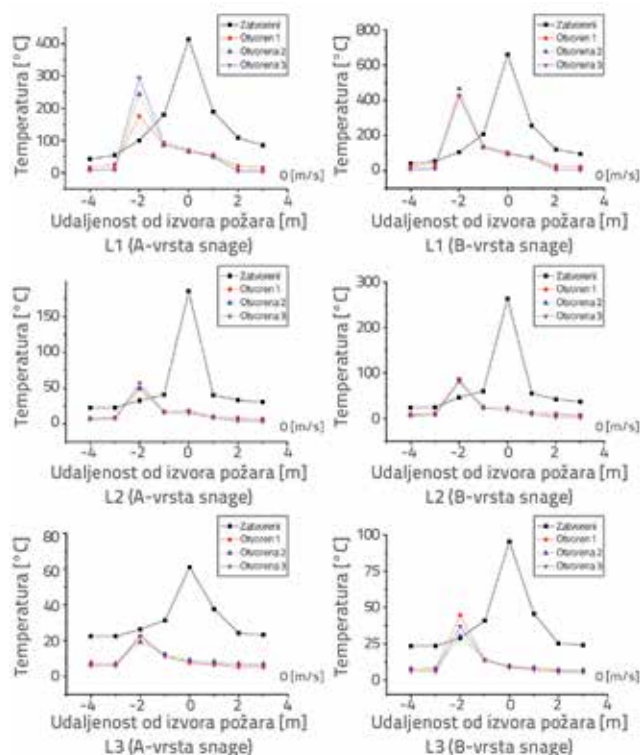
Slika 8. Raspodjela dima u tunelu ovisno o broju otvorenih zaklopki: a) Pogled na dio tunela niz struju zraka; b) Pogled na tunel uz struju zraka

3.2. Utjecaj brzine strujanja zraka i broja otvorenih zaklopki na temperaturu u tunelu

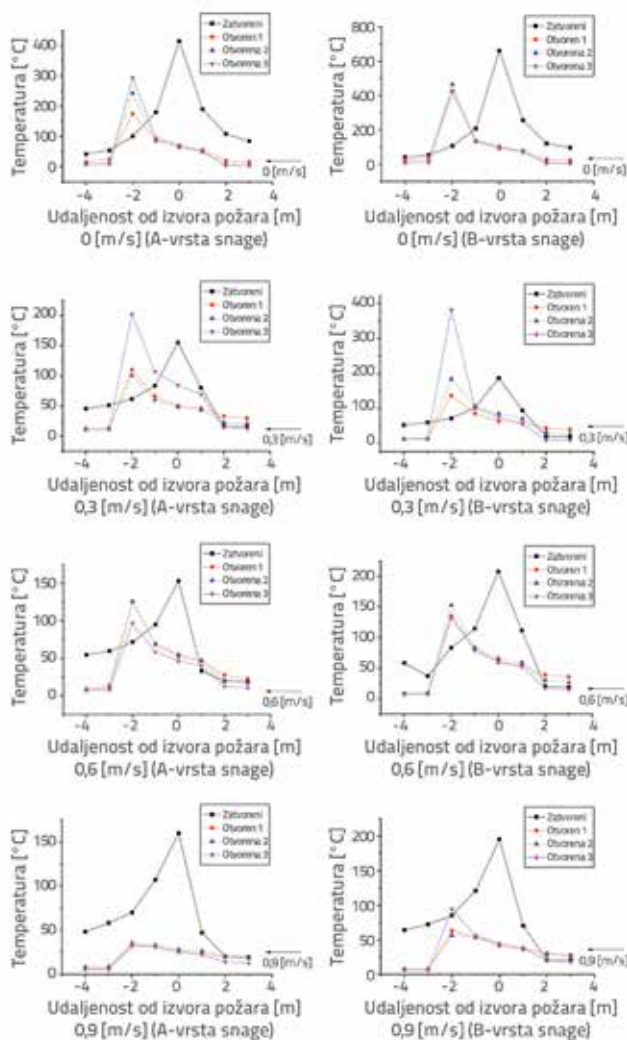
Na slikama od 9. do 12. prikazana je raspodjela temperatura u segmentima L1, L2 i L3 u raznim uvjetima, pri čemu je na ordinati prikazana temperatura, a na apscisi udaljenost od izvora požara.

Na slici 9. prikazana je uzdužna raspodjela temperatura u tunelu, bez strujanja zraka, dok su na slikama 10., 11. i 12. prikazane usporedbe raspodjele temperatura pri različitim brzinama strujanja zraka u segmentu L1 (slika 10.), u segmentu L2 (slika 11.) i u segmentu L3 (slika 12.).

Kada nema strujanja zraka i kada zaklopke nisu otvorene, temperatura je u segmentima L1, L2 i L3 simetrično raspoređena oko izvora požara, pri čemu najviša temperatura raste usporedo s porastom snage požara. Temperatura u segmentu L2 niža je od temperature u segmentu L1, a najviši pad iznosi otprilike 200 °C – 400 °C (tj. pad iznosi 50 %). Temperatura u segmentu L3 niža je od temperature u segmentu L2, a najviši pad iznosi otprilike 150 °C – 200 °C (tj. pad iznosi 65 %). Nakon otvaranja zaklopke, na simetričnu raspodjelu temperatura djeluju zaklopke pa u skladu s tim dolazi do pada najviših temperatura u segmentima L1, L2 i L3.



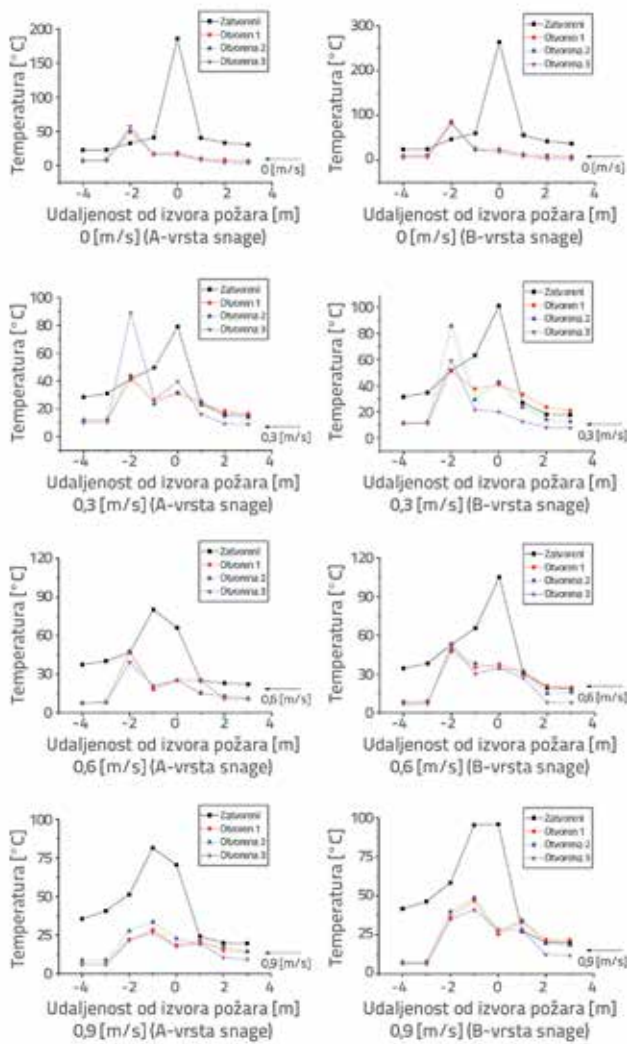
Slika 9. Uzdužna raspodjela temperatura u tunelu bez strujanja zraka



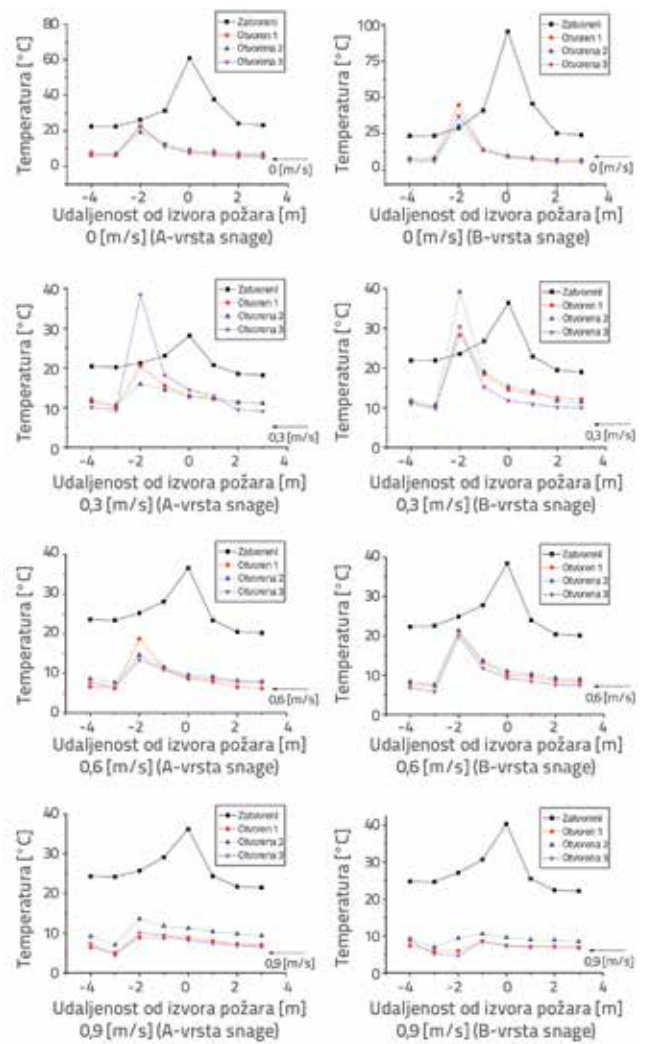
Slika 10. Uzdužna raspodjela temperatura u segmentu L1 pri različitim brzinama strujanja zraka

Kada dimovodne zaklopke nisu otvorene, temperatura dima u tunelu smanjuje se usporedo s porastom brzine strujanja zraka, ali do smanjenja temperature ipak dolazi sporije. Temperatura uzvodno od strujanja zraka brže se smanjuje od temperature u nizvodnom dijelu, što znači da se najviša temperatura pomiče prema nizvodnom dijelu. Utjecaj dima u uzvodnom dijelu tunela relativno je nizak, dok je nizvodni dio tunela pun dima koji se ispušta kroz izlaz. Zato bi u slučaju požara ljudi koji se nalaze u uzvodnom dijelu tunela trebali što brže napustiti opasno područje.

Kada se otvore zaklopke, uglavnom dužina uzdužnog toka dima najčešće se bitno smanjuje; dim se može kontrolirati u određenom prostoru oko izvora požara, a većina dima može se ispustiti kroz zaklopke. Osim toga, položaj najviše



Slika 11. Uzdužna raspodjela temperatura u segmentu L2 pri različitim brzinama strujanja zraka



Slika 12. Uzdužna raspodjela temperatura u segmentu L3 pri različitim brzinama strujanja zraka

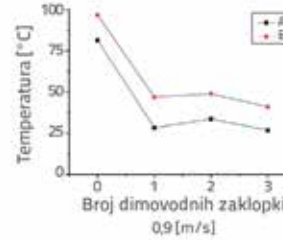
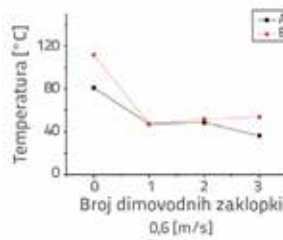
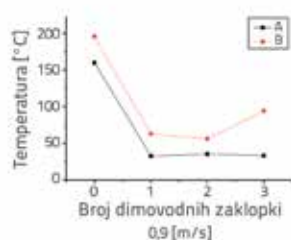
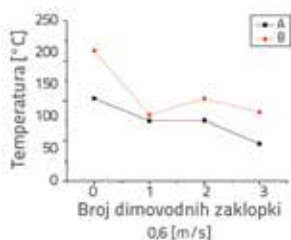
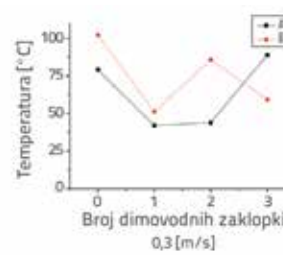
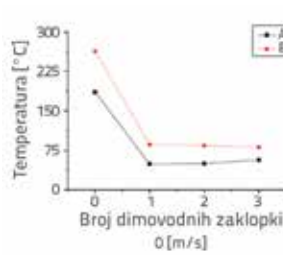
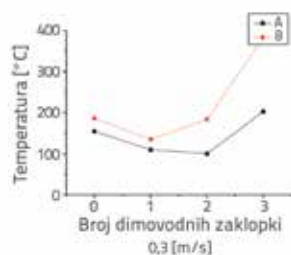
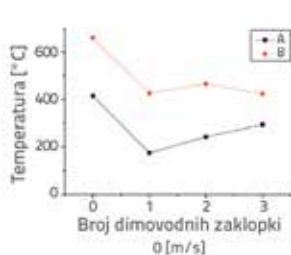
temperature mijenja se prema nizvodnom dijelu, a veliki dio dima ispušta se kroz zaklopke na nizvodnom dijelu. Kod brzine strujanja zraka od 0,3 m/s, najviša temperatura u segmentu L1 viša je od temperature pri kojoj niti jedna zaklopka nije otvorena. Tome je razlog činjenica da dolazi do turbulencije dima pod utjecajem relativno visoke brzine strujanja zraka i pravovremenog dovoda svježeg zraka, pa ispuštanje dima potiče izgaranje goriva. Kod visoke brzine uzdužnog toka zraka, tim se tokom dosta daleko prenosi i toplina. U tom slučaju mala je razlika između temperatura i to bez obzira na broj otvorenih zaklopki.

3.3. Raspodjela najviših temperatura

Raspodjelom najviših temperatura može se dodatno istražiti raspodjela temperatura u razdoblju od početka do kraja požara i to za različiti broj otvorenih zaklopki i za različite snage požara. Raspodjela najviših temperatura u različitim situacijama prikazana je u tablici 3. Kako bi se što jasnije prikazale promjene i raspodjele temperatura u tunelu (slike 13., 14. i 15.), za pojedinačne su segmente izrađeni dijagrami najviših temperatura a pritom su korišteni podaci iz tablice 3.

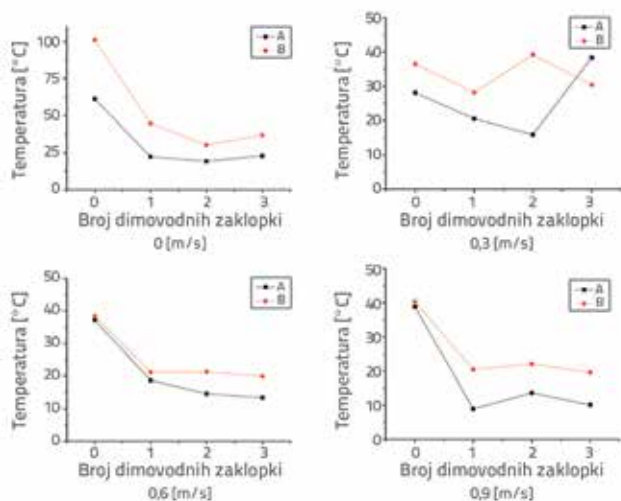
Tablica 3. Raspodjela najviših temperatura u različitim uvjetima

Visina	Brzine strujanja zraka [m/s]	Kategorija požara	Broj dimovodnih zaklopki			
			0	1	2	3
L1	0,0	A	414,2 °C	175,2 °C	243,2 °C	293,6 °C
		B	660,9 °C	426,5 °C	465,9 °C	423,3 °C
L2		A	185,6 °C	49,3 °C	50,2 °C	57,1 °C
		B	263,4 °C	86,2 °C	84,3 °C	80,9 °C
L3		A	61,2 °C	22,3 °C	19,2 °C	22,8 °C
		B	101,1 °C	44,7 °C	30,3 °C	36,9 °C
L1	0,3	A	155,2 °C	110,3 °C	100,7 °C	202,1 °C
		B	186,3 °C	135,7 °C	183,6 °C	381,8 °C
L2		A	79 °C	41,9 °C	43,8 °C	88,9 °C
		B	102,1 °C	51,1 °C	85,7 °C	59,2 °C
L3		A	28,1 °C	20,5 °C	15,9 °C	38,4 °C
		B	36,5 °C	28,2 °C	39,2 °C	30,4 °C
L1	0,6	A	153 °C	125,1 °C	125,7 °C	96,7 °C
		B	212,9 °C	132,8 °C	152,8 °C	135,9 °C
L2		A	80,9 °C	47 °C	48,5 °C	36,3 °C
		B	111,7 °C	47,3 °C	51,7 °C	53,6 °C
L3		A	37,2 °C	18,7 °C	14,6 °C	13,4 °C
		B	38,4 °C	21,2 °C	21,3 °C	19,9 °C
L1	0,9	A	159,9 °C	32,9 °C	35,5 °C	33,5 °C
		B	195,7 °C	63,1 °C	56,4 °C	94,2 °C
L2		A	81,4 °C	28,3 °C	33,5 °C	26,9 °C
		B	96,8 °C	46,9 °C	48,8 °C	40,9 °C
L3		A	38,8 °C	8,9 °C	13,6 °C	10,1 °C
		B	40,3 °C	20,4 °C	22 °C	19,6 °C



Slika 13. Najviša temperatura na segmentu L1

Slika 14. Najviša temperatura na segmentu L2



Slika 15. Najviša temperatura na segmentu L3

Strujanje zraka ima bolji učinak na odimljavanje iz tunela nakon što brzina strujanja dostigne vrijednost od 0,3 m/s. Pritom treba napomenuti da brzina smanjenja najviših temperatura u segmentima L1, L2 i L3 pada usporedo s porastom brzine strujanja zraka. Osim toga, otvaranje zaklopke također značajno djeluje na odimljavanje i smanjenje temperature. Otvaranje zaklopke pomaže i pri evakuaciji osoba i vozila, a i omogućuje spasilačkim ekipama sigurniji ulazak u tunel. Na taj se način eliminira gubitak uzrokovan vrućim dimom.

Najviša temperatura u segmentu L3, a ona iznosi otprilike 40 °C, niža je za otprilike 20 do 50 °C od najviše temperature u segmentu L2. Općenito uzevši, temperature na segmentu L3 niže su od temperatura u segmentima L1 i L2 a i variraju prilično malo (za otprilike 10 °C) kada su zaklopke 1–3 otvorene, iz čega bi se moglo zaključiti da vrući zrak iz gornjeg prostora izlazi po utjecajem strujanja na vrhu tunela. Prilikom izbijanja požara, najviša se temperatura bilježi na vrhu tunela, a u prostoru pri dnu tunela relativno niža. Zbog toga se osobe zarobljene u tunelu trebaju evakuirati kroz sigurne zone tunela, čime izbjegavaju zone visokih temperatura i većih koncentracija štetnog dima.

4. Numerička simulacija kritične brzine

4.1. Numerički model

Numerički simulacijski model definiran je na temelju stvarnog tunela Caihongling koji se nalazi u Kini. Za modeliranje strujanja fluida uslijed djelovanja požara korišten je simulator dinamike požara (eng. *Fluid Dynamics Simulator*), a model računalne dinamike fluida (*Computational Fluid Dynamics*) koristi se za modeliranje toka fluida uzrokovanog požarom. Širina stvarnog tunela iznosi 9,5 m (smjer Y) a visina 6,2 m (smjer Z). Dužina tunela iznosi 150 m (smjer X). U simulaciji je usvojeno da početna temperatura okoline iznosi 20 °C, kao materijal za stijenku tunela odabran je BETON, a profil tunela X = 0 m postavljen

je na OPSKRBA. Brzina ventilacije može se mijenjati ovisno o potrebama eksperimenta. Profil X = 150 m postavljen je na OTVORENO, tj. u kontaktu je s vanjskim atmosferskim tlakom i na njega djeluje prirodna ventilacija. U numeričkom je modelu uzdužni nagib tunela postavljen na 0 %.

4.2. Snaga požara i ventilacija

Prostor zahvaćen dimom koji se kreće prema lijevom kraju tunela postupno se smanjuje usporedo s povećanjem brzine ventilacije. Kako bi se istražila kritična brzina dima u tunelu bez povratnog toka, u ovoj se točki koristi metoda kontinuirane korekcije brzine uzdužne ventilacije pri određenoj energiji te se tako određuje odnos između snage požara i kritične brzine pojedinačno za svaku veličinu. Provedene su numeričke simulacije različitih brzina ventilacije za pet razina snage požara (5 MW, 10 MW, 15 MW, 17 MW i 20 MW).

Tablica 4. Snaga požara i uzdužne brzine strujanja zraka definirane u numeričkim modelima

Br.	Snaga požara [MW]	Brzina [m/s]
1	5	1,5; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0; 2,1; 2,15
2	10	2,1; 2,4; 2,7; 3,0; 3,2; 3,4; 3,45
3	15	3,0; 3,4; 3,5; 3,7; 3,9; 4,0; 4,1
4	17	3,2; 3,5; 3,7; 3,8; 4,1; 4,2; 4,25
5	20	0; 1,16; 2,33; 3,5; 3,8; 4,3; 4,35

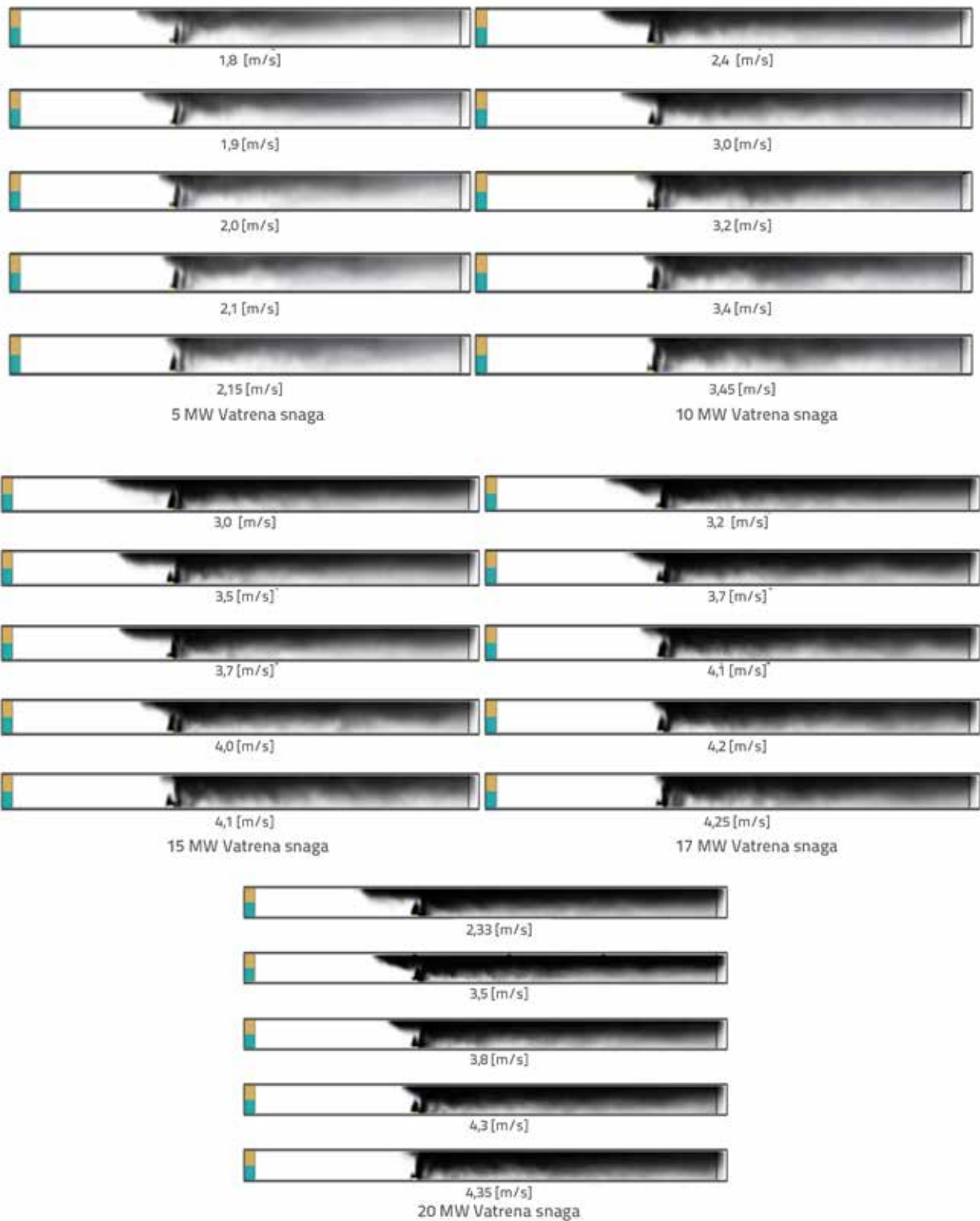
4.3. Analiza kritičnih brzina

Na slici 16. jasno se vidi da je pri maloj brzini uzdužne ventilacije velik prostor zahvaćen povratnim tokom dima. Prostor zahvaćen povratnim tokom dima smanjuje se usporedo s povećanjem uzdužne brzine. Dužina zahvaćena povratnim dimom smanjuje se usporedo s povećanjem brzine ventilacije.

Okvirno se mogu odrediti kritične brzine za različite snage požara. Tako za energije požara od 5 MW, 10 MW, 15 MW, 17 MW i 20 MW približne kritične brzine iznose redom 2,15 m/s, 3,45 m/s, 4,1 m/s, 4,25 m/s i 4,3 m/s. Izraz (7) predstavlja regresijsku jednadžbu energije požara i kritične brzine:

$$P = 1,6372 \ln(V) - 0,4163 \tag{7}$$

gdje je P energija požara dok je V kritična brzina ventilacije. U ovoj regresijskoj jednadžbi vrijednost R^2 iznosi 0,9878. Nagli rast kritične brzine bilježi se kada snaga požara poraste s 5 MW na 10 MW. Kritična brzina polako raste s porastom energije. Kada energija iz izvora požara dostigne vrijednost veću od 15 MW, kritična brzina se stabilizira te daljnje promjene u brzini nisu znatne.



Slika 16. Širenje dima pri različitim brzinama ventilacije i pri različitim energijama požara

5. Zaključak

U ovom je radu proveden niz ispitivanja na modelu tunela u mjerilu 1:15 kako bi se stekla nova znanja o djelotvornosti mjera za kontrolu dima u cestovnim tunelima te definirali obrasci raspodjele temperature i dima u tunelima. U okviru analize određena je raspodjela dima u tunelu kada su otvorene zaklopke a nema uzdužnog strujanja zraka. Analizom je također obuhvaćen utjecaj brzine strujanja zraka i broja otvorenih zaklopki na temperaturu u tunelu, kao i raspodjela najviših temperatura. Na bazi spomenute analize izvedeni su sljedeći zaključci:

- Tri faktora utječu na kontrolu dima u tunelima: brzina uzdužnog protoka zraka, broj otvorenih dimovodnih zaklopki te snaga požara. Od spomenutih faktora, na kontrolu dima najviše utječe brzina uzdužnog strujanja zraka. Promjena bilo kojeg od ta tri faktora utječe na širenje dima i raspodjelu temperature u tunelima. Međutim, s aspekta kontrole dima i gradnje tunela ne bi bilo ekonomski opravdano bazirati analizu samo na jednom faktoru. Zato se za postizanje što bolje kontrole dima trebaju razmotriti sva tri faktora.
- Kada niti jedna dimovodna zaklopka nije otvorena te kada nema uzdužnog strujanja zraka, tada se oblak dima razvija simetrično, temperatura se također širi simetrično i spušta se usporedo s porastom udaljenosti od izvora požara. Kada su dimovodne zaklopke otvorene, dim postaje rjeđi i brže se širi prema zaklopkama, temperatura se bitno smanjuje i dolazi do raslojavanja dima u tunelu.
- Uzdužno strujanje zraka djelotvorno ograničava temperaturu u uzvodnom dijelu. Nakon što brzina strujanja zraka dosegne određenu vrijednost, utjecaj dima u uzvodnom dijelu postaje praktički beznačajan. Osim toga, temperatura u blizini izvora požara spušta se usporedo s porastom brzine strujanja zraka. Uz to, temperatura na vrhu tunela pada usporedo s porastom brzine uzdužnog protoka zraka.

- Kada je ostvareno uzdužno strujanje zraka i otvorene su zaklopke, temperatura na segmentu L3 niža je od 40 °C a temperature na segmentima L1 i L2 niže su od 100 °C, iz čega se može zaključiti da su dimovodne zaklopke vrlo korisne kao sredstvo za ventilaciju u hitnim slučajevima. Osim toga, putem numeričkih simulacija analizirane su i kritične brzine za različite snage požara, tj. za snage od 5 MW, 10 MW, 15 MW, 17 MW i 20 MW. Kritičke brzine iznose otprilike 4,1 m/s, tj. 4,3 m/s za snage požara od 15 MW tj. 20 MW. Općenito uzevši, eksperimentalno određene kritične brzine variraju od 0,6 do 0,9 m/s (2,32 do 3,48 m/s u stvarnim uvjetima). Uvjeti u kojima su provedeni eksperimenti možda su razlog uočenim razlikama između numeričkih vrijednosti i eksperimentalnih rezultata. Rezultati se ipak mogu smatrati prilično pouzdanima i značajni su kao pokazatelji za fazu gašenja požara u tunelima.

U okviru ovog rada izrađen je jednostavan i praktičan model cestovnog tunela prikladan za ispitivanje požara. Model se temelji na Froudeovom kriteriju sličnosti. Ovaj rad nije samo edukativni materijal, tj. u njemu nije samo cilj prikazati analizu zajedničkog djelovanja brzine strujanja zraka, zaklopki i snage požara, već se također može koristiti i kao pomoćni materijal u definiranju parametara za instaliranje zaklopki u tunelima.

Zahvale

Za ovaj rad dodijeljena financijska potpora iz Fonda za fundamentalna istraživanja na centralnim sveučilištima (potpora br. 2015XKMS007) te potpora Zaklade za prirodne znanosti kineske pokrajine Jiangsu (potpora br. BK20181355). Autori ovom prilikom zahvaljuju na dodijeljenim potporama.

LITERATURA

- [1] Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2017, http://zizhan.mot.gov.cn/zfxxgk/bnssj/zhghs/201803/t20180329_3005087.html, 15.03.2019.
- [2] Barbato, L., Cascett, F., Musto, M., Rotondo, G.: Fire safety investigation for road tunnel ventilation systems—An overview, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43 (2014) 9, pp. 253–265.
- [3] Xie, L., Jiang, X.: Study on effect of configuration of exhaust inlets on central extraction with top exhaust system in tunnel fire, *Highway Engineering*, 38 (2013) 3, pp. 77–82.
- [4] Haack, A.: Current safety issues in tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17 (2002) 2, pp. 117–127.
- [5] Fuhua, K., Xu, B., Cheng, P.: Temperature stratification in a road tunnel, *Thermal Science*, 176 (2016) 1, pp. 156–156.
- [6] Li, Y., Ingason H.: The maximum ceiling gas temperature in a large tunnel fire, *Fire Safety Journal*, 48 (2012) 48, pp. 38–48.
- [7] Li, Y., Lei, B., Ingason, H.: The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 46 (2011) 4, pp. 204–210.
- [8] Lai, J.: Statistical analysis of fire accidents in highway tunnels and countermeasures for disaster prevention and reduction, *Tunnel Construction*, 37 (2017) 4, pp. 409–415.
- [9] Ingason, H., Li, Y., Lönnemark, A.: *Tunnel Fire Dynamics*, Springer New York, 2015.
- [10] Ji, J., Zhong, K., Li, X., Zhang, Y., Hou, R.: A simplified calculation method on maximum smoke temperature under the ceiling in subway station fires, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26 (2011) 3, pp. 490–496.
- [11] Li, Y.: Maximum ceiling temperature in a tunnel fire, *FIRE TECHNOLOGY*, 50 (2010) 4, pp. 889–905.
- [12] Yan, Z., Yang, Q., Zhu H.: An experimental study of fire hazard at the Qinling highway tunnel, *China Civil Engineering Journal*, 38 (2005) 11, pp. 96–101.

- [13] Ko, Y., Hadjisophocleous, G.: Study of smoke back layering during suppression in tunnels, *Fire Safety Journal*, 58 (2013) 2, pp. 240-247.
- [14] Michael, J., Karter, J.: Fire loss in the United States during 2013, *NFPA Journal*, 108 (2014) 5, pp. 64-69
- [15] Garlock, M.: Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies, *Engineering Structures*, 35 (2012) 1, pp. 89-98.
- [16] Ji, J., Li, K., Wang, Z., Hou, R.: Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency, *Journal of Hazardous Materials*, 177 (2010) 1, pp. 209-215.
- [17] Hu, L., Hou, R., Peng, W.: On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21 (2006) 6, pp. 650-655.
- [18] Gannouni, S., Maad, R.: Numerical study of the effect of blockage on critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 48 (2015), pp. 147-155.
- [19] Chen, L., Hu, L., Tang, W., Yi, L.: Studies on buoyancy driven two-directional smoke flow layering length with combination of point extraction and longitudinal ventilation in tunnel fires, *Fire Safety Journal*, 59 (2013) 7, pp. 94-101.
- [20] Minehiro, T., Fujita, K., Kawabata, N., Hasegawa, M., Tanaka, F.: Backlayering distance of thermal fumes in tunnel fire experiments using a large-scale model, *Journal of Fluid Science and Technology*, 7 (2012) 3, pp. 389-404.
- [21] Vauquelin, O., Mégret, O.: Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel, *Fire Safety Journal*, 37 (2002) 5, pp. 525-533.
- [22] Ingason, H., Li, Y.: Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation, *Fire Safety Journal*, 45 (2010) (6-8), pp. 371-384.
- [23] Xu, Z., Dong, Z., Zhang, X., Wang, S.: Numerical study on effects of induced velocity on central extraction system in large tunnel fire, *Procedia Engineering*, 45 (2012) 2, pp. 678-684.
- [24] Wu, D., Xu, Z., Li, W.: Fire smoke control in highway tunnel: study on smoke exhaust system of independent flue duct, China Communication Press, Beijing, 2013.
- [25] Wu, C.: Experimental study on the heat exhausting efficiency under central exhaust mode prone to tunnel fires, *Journal of Safety and Environment*, 13 (2013) 4, pp. 156-160.
- [26] Yi, L., Li, Y., Xu, Z.: Experimental study on effect of semi-horizontal extraction on tunnel fire, *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 31 (2011), pp. 85-90.
- [27] Kashef, A.: Fire and Smoke Control in Road Tunnels- A Case Study, *Ashrae Transactions*, 114 (2008) 2, pp. 283-292.
- [28] China Ministry of Transportation: Specification for Design of Highway Tunnels Section 2 Traffic Engineering and Affiliated Facilities, Beijing: China Communication Press, 2014.
- [29] China Ministry of Transportation: Guidelines for design of highway tunnel (JTC/T D70-2010), Beijing: People's China Communication Press. 2010.
- [30] World Road Association: Design fire characteristics of road tunnels Technical Committee 3.3 Road Tunnels Operations, CEDEX, France, ISBN 978-2-84060-417-6
- [31] The road tunnels manual, 2019.6-26, <https://tunnels.piarc.org/en/introduction/road-tunnels-manual>