

Djelovanje sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požara

Drakulić, Miodrag

Doctoral thesis / Disertacija

2006

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:755893>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



**DJELOVANJE SUSTAVA UZDUŽNE VENTILACIJE
CESTOVNOG TUNELA U UVJETIMA POŽARA**

DOKTORSKI RAD

Voditelj doktorskog rada:

Prof. dr. sc. Petar Donjerković

Izradio:

mr. sc. Miodrag Drakulić

ZAGREB, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 624.191.94

Ključne riječi: cestovni tunel, ventilacija, požar, operativna strategija, automatsko upravljanje

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarsvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: **BRODARSKI INSTITUT** d.o.o.
Av. V. Holjevca 20, 10020 Zagreb

Mentor rada: **Prof. dr. sc. Petar Donjerković**

Broj stranica (ukupno): 166

Broj slika: 53

Broj fotografija: 11

Broj tablica: 15

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 82

Datum obrane: 25. 04. 2006.

Povjerenstvo: **Dr. sc. Zdravko Virag, red. prof. - predsjednik**
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
Dr. sc. Petar Donjerković, red. prof. - mentor
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
Dr. sc. Neven Duić, docent
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
Dr. sc. Jurij Modić, izv. prof.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, Slovenija
Dr. sc. Dubravka Bjegović, red. prof.
Građevinski fakultet, Zagreb

Institucija u kojoj je rad pohranjen: **Fakultet strojarstva i brodogradnje**
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb

*"I'm a great believer in luck,
and I find the harder I work
the more I have of it."*

Thomas Jefferson, USA

ZAHVALA

Svima koji su mi pomogli pri izradi ovog rada, u bilo kojoj fazi njegovog nastanka, svesrdno se zahvaljujem, nadajući se pritom da će se oni najzaslužniji prepoznati u ovoj zahvali. Ipak, osjećam potrebu na ovaj način zahvaliti se kolegi *Milanu Careviću*, s kojim sam proveo mnogo vremena u plodnim polemikama i analizama različitih požarnih scenarija ugrađenih u brojne studije i projekte cestovnih tunela, na kojima uspješno surađujemo već niz godina.

Koristim također priliku zahvaliti se mojim kolegama i suradnicima iz *Brodarskog instituta*, u kojem je rad i nastao, a koji su mi nesebično pomogli u njegovoj finalizaciji i grafičkom oblikovanju. Od mnogih, izdvajam kolege *Milana Smiljanića*, *Arbena Abrashija* i *Vedrana Bakarića*. Svojim sugestijama na završni tekst, *dr. sc. Miroslav Sambolek* pomogao mi je na terminološkom usklađivanju cjelokupnog rada, na čemu mu se također zahvaljujem.

Posebno se ovdje želim zahvaliti svom mentoru, ***prof. dr. sc. Petru Donjerkoviću***, na dugogodišnjoj podršci mojem znanstveno-stručnom radu i usavršavanju, od studentskih dana i diplomskog rada, preko magisterija, pa sve do realizacije ove doktorske disertacije. Svojom strpljivošću, korisnim savjetima i konzultacijama uvelike mi je pomogao u želji da ovaj rad učinim sveobuhvatnim i nadam se znanstveno vrijednim.

Na kraju, svojim dragim roditeljima u znak zahvalnosti na svemu što su mi nesebično pružili i mojoj velikoj životnoj inspiraciji, kćeri *Sandi*, posvećujem ovaj rad.

SADRŽAJ

	str.
• OZNAKE	7
• PREDGOVOR	10
• SAŽETAK	12
• SUMMARY	13
1. UVOD	14
1.1. Definicija problema	14
1.2. Hipoteza rada	18
1.3. Obrazloženje hipoteze	18
2. METODOLOGIJA RADA	20
3. POSTOJEĆE SPOZNAJE IZ PREDMETNOG PODRUČJA	24
4. OPERATIVNA STRATEGIJA RADA SUSTAVA VENTILACIJE	29
4.1. Uvod	29
4.1.1. Tunel kao tehničko-tehnološka cjelina	29
4.1.2. Faktori sigurnosti u cestovnom tunelu	36
4.2. Analiza temeljnih aerodinamičkih pojava	39
4.2.1. Uvodne napomene	39
4.2.2. Numeričko modeliranje aerodinamičkih pojava	40
4.2.2.1. Uvjeti simulacije	40
4.2.2.2. Geometrija objekta	41
4.2.2.3. Diskretizacija objekta	42
4.2.3. Stratifikacija dima	43
4.2.4. Odimljavanje i kritična brzina strujanja zraka	53
4.2.4.1. Utjecaj uzdužne brzine zraka na širenje dima u fazi odimljavanja	54
4.2.4.2. Određivanje kritične brzine strujanja zraka	56
4.2.5. Povratno slojevito širenje dima	60
4.2.6. Zaključak	66

4.3.	Vremenska rasčlana požarnog incidenta	67
4.3.1.	Faze požarnog incidenta	67
4.3.2.	Vremenski slijed i kauzalitet faza	70
4.3.3.	Zahtjevi za održavanje optimalnih formi razvoja i širenja dima	73
4.4.	Najbolje prakse djelovanja sustava uzdužne ventilacije tunela u uvjetima požara	74
4.4.1.	Uvod	74
4.4.2.	Pregled djelovanja sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara	75
4.4.3.	Izbor požarnog opterećenja	79
4.5.	Uloga sustava ventilacije u tipičnim požarnim scenarijima	84
4.5.1.	Tipični požarni scenarij u dvocijevnom tunelu	85
4.5.1.1.	Prometno-evakuacijski model istosmjernog prometa	85
4.5.1.2.	Prometno-evakuacijski model dvosmjernog prometa	88
4.5.2.	Tipični požarni scenarij u jednocijevnom tunelu	91
5.	SINTEZA OPERATIVNE STRATEGIJE SUSTAVA VENTILACIJE	94
5.1.	Uvodne napomene	94
5.2.	Karakteristike operative strategije	95
5.3.	Struktura generičkih algoritama upravljanja sustavom ventilacije	97
5.3.1.	Unutarnja struktura generičkog algoritma	97
5.3.2.	Vizualno okruženje generičkog algoritma	106
6.	AUTOMATSKE SEKVENCIJE RADA VENTILACIJSKOG SUSTAVA	109
6.1.	Uvodne napomene	109
6.2.	Definiranje matematičkog modela strujanja zraka u tunelu	109
6.2.1.	Temeljne pretpostavke	109
6.2.2.	Osnovne fizikalne zakonitosti procesa strujanja	111
6.2.3.	Osnovni matematički model strujanja	111
6.2.3.1.	Varijable sustava	112
6.2.3.2.	Obrazloženje smanjena ravnoteže aksijalnih sila	113

6.3.	Definiranje općeg regulacijskog modela	118
6.3.1.	Uvodne napomene	118
6.3.2.	Struktura algoritma kontrole uzdužnog strujanja	121
6.4.	Postupak verifikacije regulacijskog modela	123
6.4.1.	Uvodne napomene	123
6.4.2.	Verifikacija regulacijskog modela postupkom numeričke simulacije	123
6.4.3.	Rezultati numeričke simulacije regulacijskog modela	126
6.4.3.1.	Uvod	126
6.4.3.2.	Izračun integrala brzine zračne struje	127
6.4.3.3.	Dinamika procesa umirivanja i stabilizacije brzine zračne struje	129
7.	IMPLEMENTACIJA OPERATIVNE STRATEGIJE	132
7.1.	Organizacijske mjere i koherentnost rada ostalih sustava	132
7.2.	Pogonske karakteristike i stanje opreme	132
8.	ZAKLJUČAK	136
9.	PRILOZI	139
9.1.	Prilog 1 SIMULACIJA POŽARA MODELIRANJEM U CFD PROGRAMU	140
9.2.	Prilog 2 GENERIČKI ALGORITMI UPRAVLJANJA	149
•	LITERATURA	
•	POPIS GRAFIČKIH PRILOGA	
•	KRATKI ŽIVOTOPIS	
•	SHORT BIOGRAPHY	

O Z N A K E

□ Veličine

simbol	opis	jedinica
A	površina	m^2
a	akceleracija	m/s^2
$B, \bar{s}$	širina	m
C	koeficijenti, razni	-
c	specifična toplina	J/kgK
D	promjer	m
F	sila	N
g	gravitacijska akceleracija	m/s^2
H, h	visina	m
i	faktor forme (vozila)	-
K, k	empirijski faktori	-
L, l	duljina	-
m	masa	kg
N	broj (ventilatora, vozila, senzora)	-
O	opseg	m
p	tlak	Pa
Q	toplinska snaga	W (MW)
R	plinska konstanta	J/kgK
S	put, duljina prostiranja dima	m
T	apsolutna temperatura	K
t	temperatura	°C
	vrijeme	s (h)
u, v	uzdužna brzina	m/s

□ Bezdimenzijske značajke

Fr	<i>Froudeov broj</i>
Re	<i>Reynoldsov broj</i>
M	<i>Machov broj</i>

□ Grčki alfabet

simbol	opis	jedinica
Δ	razlika, diferencija	-
α	koeficijent prijelaza topline	W/m ² K
	empirijski faktor (Pogl. 4.4.3.)	kW/s ²
	kut	° (rad)
β	empirijski faktor (Pogl. 4.4.3.)	kW/s ²
σ	<i>Stefan-Boltzmannova</i> konstanta zračenja	W/m ² K ⁴
ε	emisioni koeficijent	-
ν	kinematička viskoznost	m ² /s
τ	vrijeme	s (h)
λ	koeficijent otpora trenja	-
ζ	koeficijent lokalnog otpora	-
ρ	gustoća	kg/m ³

□ Indeksi

0	početni, osnovni
<i>b</i>	barometarski
<i>C</i>	kritično
<i>D</i>	dima
<i>d</i>	dinamički
<i>F</i>	forme (vozila)
<i>f</i>	trenja
<i>h</i>	hidraulički
<i>i, k</i>	indeksi u indeksnoj notaciji
<i>izl</i>	izlazno
<i>L</i>	odnosi se na ukupnu dužinu
<i>m</i>	srednja vrijednost
max	maksimalni
min	minimalni
<i>N</i>	nazivno, nominalno
<i>OK</i>	okoline
<i>P</i>	požarno

simbol	opis	jedinica
S	senzora	
s	segmenta	
t	tunela	
ul	ulazno	
V	vjetra, ventilatora	
W	stjenke, zida	
Z	zraka (uzduha)	

□ **Kemijski spojevi**

CO	ugljkov monoksid
CO ₂	ugljkov dioksid
NO _x	dušikovi oksidi

PREDGOVOR

Ovaj doktorski rad nastao je kao rezultat višegodišnjih znanstvenih (teorijskih i eksperimentalnih) istraživanja obavljenih u *Brodarskom institutu* od 1997. godine, te niza znanstvenih i stručnih radova autora i suradnika iz područja ventilacije, te protupožarne i protu-terorističke zaštite cestovnih tunela, prezentiranih na domaćim i međunarodnim skupovima. Sve gore navedene aktivnosti proizašle su iz sudjelovanja autora u realizaciji ambicioznog programa Vlade RH na izgradnji domaće cestovne mreže [1], koji je velikim dijelom već ostvaren¹, a odnosi se na izgradnju suvremenih autocesta i kapitalnih objekata cestovne infrastrukture, od kojih su tuneli svakako najznačajniji i najsloženiji.

Paralelno sa spomenutim aktivnostima obavljena su, uz nadzor autora, opsežna terenska ispitivanja i mjerenja pogonskih karakteristika sustava ventilacije domaćih cestovnih tunela u izgradnji, sa ciljem pronalaženja optimalne uloge ventilacijskog sustava u različitim scenarijima zaštite od požara. Navedena istraživanja su provedena u razdoblju od 2000. godine, pa sve do današnjih dana, a planiraju se nastaviti i dalje kroz primjenu specijalno prilagođenih požarnih testova kojima će se u realnim uvjetima provjeriti efikasnost sustava uzdužne ventilacije u procesu kontrole uzdužnog strujanja zraka i širenja dima. U tom smislu, predmetni doktorski rad predstavlja logičan nastavak i produbljivanje istraživanja opisanih kroz posebna poglavlja magistarskog rada s naslovom "*Analiza modelskih ispitivanja sustava ventilacije prometnih tunela*", obranjenog 2000. godine, a sve u cilju povećanja sigurnosti i zaštite putnika i spasilačkih službi, te zaštite tunela kao kapitalnih objekata prometne infrastrukture i općeg društvenog dobra.

Kao naznaka budućih pravaca istraživanja uloge ventilacijskog sustava u požarnom incidentu, u zaključku magistarskog rada navedena je složena problematika interakcije određenih aerodinamičkih pojava sa odabranim režimom rada ventilacijskog sustava. No, za razliku od magistarskog rada, gdje su prvenstveno analizirani fizikalni² i geometrijsko-tehnički³ parametri tunela, koji utječu na rad sustava ventilacije, u predmetnom doktorskom radu obavljena je stanovita inverzija u pristupu prilikom definiranja uloge ventilacijskog sustava u uvjetima požarnog incidenta.

¹ Do sada izgrađeno 813 km od ukupno predviđenih 1.500 km autocesta (izvor HAC, 2006.).

² npr. temperatura zraka, uzdužna brzina strujanja zraka i dr.

³ npr. udaljenost ventilatora od svoda tunela, kut izlaznog mlaza zraka, međusobni razmak ventilacijskih baterija i dr.

Naime, sustav ventilacije stavljen je u **aktivnu ulogu**, s potrebom da se definira optimalni scenarij njegovog djelovanja, kako bi postupak evakuacije putnika, kao i aktivnosti vatrogasnih i spasilačkih ekipa na terenu bile sigurnije i učinkovitije.

Djelovanje sustava ventilacije u uvjetima požarnog incidenta može se danas podvesti pod opće prihvaćeni jedinstveni termin „**operativne strategije**“⁴ rada ventilacijskog sustava. U vrijeme definiranja teme ovog doktorskog rada 2001./2002. godine, navedeni termin nije bio opće prihvaćen kao terminološka odrednica niti sadržajno definiran. U međuvremenu je prihvaćen od strane strukovnih organizacija i tijela, prvenstveno PIARC⁵-a, kao vodeće međunarodne organizacije iz područja cestovnog prometa.

Ranije spomenuta inverzija u djelovanju sustava ventilacije, sadržana u pomaku od pasivne prema aktivnoj ulozi, postupno se kao ideja razvijala kroz brojne konkretne tehničke probleme koje je autor rješavao tijekom višegodišnjeg rada na razvoju, ispitivanjima i projektiranju sustava uzdužne ventilacije cestovnih tunela u *Brodarskom institutu* u Zagrebu. Dakako, zapažanja i provjere određenih postavki, koje su ugrađene u operativnu strategiju sadržanu u ovom radu, nije bilo moguće provoditi u izotermnim uvjetima modelskih ispitivanja obavljenih u *Laboratoriju za hidrodinamiku* tijekom 1998. godine.

Zbog realnih ograničenja modelskih ispitivanja s „hladnim“ dimom, sistematski su provedena realna, neizotermna ispitivanja tijekom 2004. i 2005. na tunelima novootvorene autoceste *A1 Zagreb–Split*⁶, uz veliko razumijevanje i potporu *Hrvatskih autocesta d.o.o.* Ispitivanja su se sastojala od niza tzv. „požarnih testova“ i pripadajućih terenskih mjerenja pogonskih karakteristika ventilacijskih sustava, čime su uz brojne numeričke simulacije aerodinamičkih fenomena, stečena dragocjena saznanja koja su naposljetku oblikovala operativnu strategiju u obliku u kojem se prezentira ovom doktorskom disertacijom.

⁴ engl. „Operational Strategies“; moguće je prevesti i kao „pogonske strategije“.

⁵ engl. „Permanent International Association of Road Congress“, odnosno u kraćem obliku „World Road Association“.

⁶ tuneli *Grič, Brinje, Plasina, Sveti Rok i Mala Kapela*

SAŽETAK RADA

UDK : 624.191.94

DJELOVANJE SUSTAVA UZDUŽNE VENTILACIJE CESTOVNOG TUNELA U UVJETIMA POŽARA

Miodrag Drakulić

U radu su analizirani mogući scenariji djelovanja sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požarnog incidenta, s ciljem povećanja zaštite i sigurnosti putnika, vatrogasnih i spasilačkih službi, kao i očuvanja integriteta građevine u cjelini. Pri tome je posebna pažnja posvećena proučavanju aerodinamičkih fenomena raspodjele i širenja dima unutar tunela, zbog potrebe da se svakoj fazi požarnog incidenta pridruže oni oblici razvoja i širenja dima koji bi omogućili postizanje optimalnih uvjeta za provedbu karakterističnih aktivnosti promatrane faze (npr. evakuacija putnika, gašenje požara i dr.).

Sinteza saznanja i podataka dobivenih iz niza provedenih požarnih testova i terenskih ispitivanja sustava ventilacije novoizgrađenih domaćih tunela, uz uvažavanje postojećih znanstvena dostignuća iz predmetnog područja, te korištenje rezultata modeliranja razdiobe dima suvremenim CFD alatom, dovelo je do oblikovanja cjelovite operativne strategije sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara. Predmetna strategija prikazana je u obliku „*generičkih algoritama*“, čija unutarnja struktura je potpuno neovisna o raspoloživim pogonskim mogućnostima sustava uzdužne ventilacije, te geometrijskim i građevinskim specifičnostima pojedinog tunela.

U radu su također obrazloženi i karakteristični detalji matematičkog i regulacijskog modela upravljanja sustavom ventilacije, koji su okosnica računalnog programa za kontrolu uzdužnog strujanja. Program, koji je u završnoj fazi razvoja, predviđen je za upravljanje sustavom uzdužne ventilacije u automatskim sekvencijama rada, kako u uvjetima normalnog pogona, tako i u uvjetima požarnog incidenta, za koji je prvenstveno i razvijen.

Ključne riječi:

cestovni tunel, ventilacija, požar, operativna strategija, automatsko upravljanje

SUMMARY

UDC : 624.191.94

THE ROLE OF THE LONGITUDINAL VENTILATION SYSTEM IN ROAD TUNNEL FIRE ACCIDENTS

Miodrag Drakulić

The dissertation discusses the possible operating scenarios of a longitudinal ventilation system in the conditions of road tunnel fire accidents with the aim of increasing the safety and security of passengers, fire brigades and rescue teams, as well as maintaining the integrity of the tunnel itself. Special attention is paid to aerodynamic phenomena of smoke distribution and propagation inside the tunnel in order to define the best suitable smoke propagation forms which create optimum conditions for activities characteristic of a particular fire phase (e.g. evacuation of passengers, fire-fighting etc).

A synthesis of the data and knowledge generated by a number of fire tests and on-site testing of the tunnels recently constructed in Croatia, combined with the state-of-the-art scientific achievements in this field, and with the results of smoke propagation modelled by modern CFD tool, has led to the creation of a comprehensive operational strategy for the longitudinal ventilation system in the event of a fire. The strategy is presented in the form of “*generic algorithms*” whose internal structure is completely independent of the operational possibilities of a longitudinal ventilation system and of the geometric and civil engineering characteristics of the particular tunnel.

The dissertation also presents the main features of mathematical and regulation models of ventilation system operation, which are the main part of the software for longitudinal velocity control, currently in the final phase of development. The software is expected to control the longitudinal ventilation system in automatic sequences of operation, both in normal operating conditions and especially during fire accidents.

Key words:

road tunnel, ventilation, fire, operational strategy, automatic control

1. UVOD

1.1. Definicija problema

Sustavi ventilacije cestovnih tunela imaju važnu ulogu u njihovoj eksploataciji, kako u redovnom pogonu prometovanja (u daljnjem tekstu: *redovni pogon*) tako i u uvjetima požarnog incidenta. U redovnom pogonu, gdje im je osnovna zadaća održavanje koncentracije štetnih plinova (pretežno CO i NO_x) i krutih čestica unutar dopuštenih granica, predstavljaju energetske daleko najzahtjevniju instalaciju. Istovremeno, sustav ventilacije ima značajan udjel i u ukupnoj investicijskoj vrijednosti opremanja tunela.

U uvjetima požarnog incidenta, sustavi ventilacije participiraju u protupožarnoj zaštiti, ovisno o primijenjenom tipu ventilacije i odabranoj operativnoj strategiji rada. Također se smatra značajnom, ali još uvijek u cijelosti neistraženom i uloga ventilacije u očuvanju statičke stabilnosti i fizičkog integriteta same građevine, iako u pogledu izučavanja vatrootpornosti građevinskih elemenata tunela postoji niz relevantnih radova [2; 3]. Naime, sustav ventilacije putem promjena u režimu strujanja zraka posredno utječe na proces izgaranja i razvijenu toplinu požara [4], na temperaturu dima neposredno ispod svoda tunela [5], kao i na uvjete konvektivnog prijelaza topline s vrućeg dima na betonsku oblogu tunela. Na taj način režim strujanja zraka, uspostavljen radom ventilacijskog sustava, izravno utječe na toplinsko opterećenje različitih elemenata građevinske fizike tunela (sekundarne obloge tunela, spuštenih stropova za smještaj sustava za distribuciju zraka i sl.). Kod nekih tipova tunela, kao što su npr. podvodni [6], spomenuto toplinsko opterećenje je izuzetno važno, jer u sprezi s ostalim uobičajenim opterećenjima građevine može biti uzrokom kolapsa betonske strukture tunela i posljedično tome dovesti do naplavlivanja tunela s katastrofalnim posljedicama.

Recentni požari u velikim europskim tunelima (Tablica 1.) pokazali su da sustavi poprečne ventilacije sa srodnim inačicama, do sada tradicionalno smatrani „visoko-sigurnim“, nisu postigli očekivanu efikasnost u uvjetima požara, te da postoje znatne razlike među znanstvenicima i stručnjacima u vezi s ulogom ventilacijskih sustava u požarnim incidentima i njihove objektivne valorizacije. Evidentno nepostojanje jedinstvenih stavova i razrađenih scenarija rada ventilacijskih sustava za slučaj požara ima za posljedicu da se većina važnih odluka tijekom nastanka i razvoja požara ostavlja u domeni osobne procjene stručnog osoblja na terenu (operatera, vatrogasaca, spasilačkih ekipa i policije).

Nažalost, uvjeti za donošenje takvih odluka su iz razumljivih razloga vrlo nepovoljni zbog niza faktora (stres, nepouzdanost i/ili kontradiktorne informacije, prezasićenost u percipiranju alarmnih stanja i sl.).

Tablica 1. Požari u cestovnim tunelima (izbor autora, različiti izvori)

TUNEL/ ZEMLJA/ DULJINA	GOD.	UZROK POŽARA	BROJ ŽRTAVA	UNIŠTENA VOZILA	OŠTEĆENJA TUNELA
Prvi registrirani ozbiljni požar u tunelu:					
Holland Tunnel New York, SAD 2600 m	1949.	Zapaljenje posude s ugljikovim sulfidom, pri padu s teretnjaka	66 ozlijeđenih inhalacijom dima	10 teretnih vozila 13 osobnih vozila	Ozbiljno, 200 m spuštenog stropa
Recentni požari s katastrofalnim posljedicama:					
Mont Blanc Francuska/Italija 11600 m	24.03. 1999.	Požar teretnog vozila natovarenog brašnom i margarinom	39 mrtvih	23 teretna vozila 10 osobnih vozila 1 motocikl 2 vatrog. vozila	Ozbiljno, 900 m Prijašnji požari: 1974. i 1990., bez mrtvih
Tauern Austrija 6400 m	29.05. 1999.	Prometna nesreća i požar vozila sa lak sprej dozama	12 mrtvih 49 ozlijeđenih	26 osobnih vozila 14 teretnih vozila	Ozbiljno, 500 m
Gleinhalm Austrija 8320 m	06.08. 2001.	Prometna nesreća kombija i vozila, s požarom	5 mrtvih 4 ozlijeđena		
St. Gotthard Švicarska 16918 m	24.10. 2001.	Prometna nesreća- sudar 2 kamiona, požar kamiona s teretom guma	11 mrtvih	13 teretnih vozila 10 osobnih vozila	Tunel zatvoren 2 mjeseca, uništeno oko 250 m tunela. Prijašnji požari: 1984., bez mrtvih

Napomena: podaci o broju žrtava i uništenim vozilima se razlikuju ovisno o izvoru!

S druge strane, današnji sofisticirani sustavi integralnog upravljanja prometom i instalacijama (opremom) tunela, omogućuju visoki stupanj automatizacije rada svih vitalnih sustava tunela, uključujući i ventilaciju. Zato se ti sustavi u pravilu i koriste kao standardno i opće prihvaćeno rješenje upravljanja tunelom u uvjetima redovnog pogona. Čak štoviše, zbog konstantne potrebe za redukcijom vrlo visokih troškova uvjetovanih potrošnjom električne energije, za upravljanje sustavima ventilacije kompleksnih tunela razvijeni su različiti sofisticirani sustavi upravljanja, tzv. „ekspertni“ sustavi [7]. Njihov osnovni cilj je optimizacija rada ventilacijskog sustava po kriteriju minimalne potrošnje energije, a djelovanje im se temelji na izravnom mjerenju prometnih karakteristika (intenziteta prometa, brzine vožnje, kategorije vozila i dr.), a ne polutanata u zraku, kao indirektno posljedice odvijanja prometa u tunelu.

Međutim u uvjetima požara, kada iz objektivnih razloga dolazi do zagušenja u protoku informacija i smanjenih kognitivnih sposobnosti operatera, automatizacija pojedinih sekvencija rada ventilacijskog sustava, tj. primjena specijalno razvijenih *Požarnih programa*, koji bi „rasteretili“ operatera i stručno osoblje, nije našla podjednaku primjenu i rasprostranjenost u praksi kod različitih tipova sustava ventilacije.

U tom smislu, u posljednje vrijeme značajni napori su učinjeni u pogledu analize uzroka recentnih požara [8; 9] i razrade operativnih strategija rada poprečne (transverzalne) i njoj srodne polu-poprečne (semi-transverzalne) ventilacije. U vezi s time, pokrenut je razvoj specifičnih *Požarnih programa*, koji imaju za cilj upravljati relativno složenim postupcima prelaska iz redovnog u požarni režim rada, što je karakteristika navedenih sustava ventilacije.

Prema mišljenju autora, u slučaju sustava uzdužne ventilacije nije napravljen istovjetan kvalitativni pomak kao kod gore spomenutih sustava, iako sustavi uzdužne ventilacije imaju odlučujuću ulogu u postupku spašavanja i evakuacije putnika.

Naime, sustavi uzdužne ventilacije svojim radom izravno utječu na brzinu i smjer kretanja (propagaciju) dima unutar tunelske cijevi, koja se istovremeno koristi kao glavni ili kao pomoćni pristupno-evakuacijski put. Na taj način efikasnost i uspješnost evakuacije putnika, kao i mogućnost pristupa požaru, te sigurnost vatrogasno-spasilačkih službi na terenu izravno ovise o fenomenologiji raspodjele dima unutar tunelske cijevi. Pod pojmom „*fenomenologija raspodjele dima*“ podrazumijevaju se raznoliki aerodinamički efekti koji nastaju interakcijom vruće zračne mase i dima sa djelovanjem ventilacijskog sustava, odnosno utjecajem vanjskih meteoroloških parametara. Svi navedeni aerodinamički efekti su u izravnoj vezi s termodinamikom požarnog procesa, te se moraju promatrati kao složeni, kombinirani i simultani procesi.

Razina upravljanja ventilacijskim sustavom, a konzekventno tome i mogući utjecaj ventilacijskog sustava na spomenute aerodinamičke pojave tijekom požarnog incidenta može bitno varirati, od razine simplificiranog tzv. **pasivnog upravljanja** do razine složenih upravljačkih algoritama koji karakteriziraju **aktivno upravljanje** sustavom uzdužne ventilacije.

U vezi s prethodno izloženom podjelom ventilacijskih sustava u pogledu primijenjene razine upravljanja uzdužnim strujanjem zraka i dima u tunelu, potrebno je napomenuti da ista nije u potpunosti sukladna s terminima upravljanja iz teorije automatske regulacije i upravljanja. Naime, spomenuta distinkcija upravljanja koju autor koristi u radu, uzima kao kriterij podjele mogućnost sustava ventilacije da upravlja uzdužnim strujanjem zraka u tunelu, a ne strukturu sustava automatskog upravljanja kojom se to provodi! Tako se, na primjer, podrazumijeva da aktivno upravljanje sustavom ventilacije u procesu kontrole uzdužnog strujanja zahtjeva primjenu zatvorenih sustava upravljanja s povratnom vezom, međutim struktura takvog sustava automatskog upravljanja nije predmet analize.

Pri tome treba napomenuti da pojam „upravljanja“ obuhvaća veći broj zadataka od pojma „regulacije“. Usporedbom pojmova „upravljanje“ i „reguliranje“, uočljivo je da su zadaci regulacije uključeni u zadaću upravljanja, koja obuhvaća i složena pitanja, kao što su adaptacija, optimizacija, odlučivanje itd. [10]. U ovom radu navedeni pojmovi se često koriste kao sinonimi, no iz konteksta će biti jasno o kakvom se zadatku stvarno radi.

(!) Cilj aktivnog upravljanja sustavom ventilacije cestovnog tunela je postizanje i održavanje unaprijed definiranih pogonskih parametara sustava, kako bi on svojim djelovanjem na razvoj i rasprostiranje dima/zraka u što većoj mjeri pogodio trenutnim aktivnostima na terenu, u svim fazama razvoja požara.

Međutim, uloga sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara se u većini praktičnih slučajeva krajnje simplificira i svodi tek na nekoliko osnovnih „ON/OFF“ operacija, bez kontinuiranog praćenja efekata rada ventilacijskog sustava na razvoj požara i upravljanje dimom. Iz toga razloga, predmetni sustav uzdužne ventilacije vrlo često ne postiže očekivane efekte, čak štoviše, zbog nepravovremene ili neusklađene akcije može negativno utjecati na tijek i uspješnost evakuacije putnika i sigurnost spasilačkih ekipa. Ovo se događa usprkos stvarnim tehničkim mogućnostima predmetnog sustava, koji zbog velikog broja ekvidistantno smještenih, reverzibilnih ventilatora može pouzdano i efikasno odgovoriti na složene zahtjeve koje nameće tako dinamičan i nepredvidiv proces kao što je požar. Preduvjet za aktivnu ulogu ventilacijskog sustava u požarnim uvjetima je definiranje, razrada i implementacija odgovarajuće operativne strategije rada, koja će predstavljati optimalnu kombinaciju upravljačkih algoritama za ručno-daljinski i automatski rad sustava ventilacije, primjenljivih u svim fazama požara.

1.2. Hipoteza rada

Primjenom razrađenog i usavršenog algoritma upravljanja ventilacijskim sustavom u uvjetima požara, koji se temelji na interaktivnom djelovanju sustava uzdužne ventilacije i svih relevantnih aerodinamičkih procesa utjecajnih na nastanak, razvoj i tijek požara u cestovnom tunelu, moguće je postići višu razinu sigurnosti sudionika u prometu, kao i očuvanja stabilnosti same građevine u odnosu na postojeća tehnička rješenja.

1.3. Obrazloženje hipoteze

Do danas nisu razvijene opće prihvaćene operativne strategije upravljanja sustavom ventilacije u incidentnim situacijama, iako se na tome intenzivno radi. Postojeće nacionalne strategije su rezultat karakterističnog pristupa svake zemlje u rješavanju ovog problema, a uvjetovane su različitim faktorima (npr. stupnjem prometne povezanosti zemlje s međunarodnom mrežom prometnica, tradicijom u tunelogradnji, brojem izgrađenih tunela i njihovim građevinskim karakteristikama, prevladavajućim tipom ventilacije, ekonomskom razvijenosti i razinom tehničke kulture, postojanjem domaće proizvodnje ventilacijske opreme i prateće opreme za upravljanje sustavima i dr.).

U tom smislu je PIARC, kao krovna međunarodna organizacija iz područja cestovnog prometa, u sklopu brojnih aktivnosti *Tehničkog Komiteta C5* [11] i ekspertne radne grupe *WG 6 (Ventilation and Smoke Control)*, definirao zadaću⁷ da se harmoniziraju nacionalne strategije upravljanja ventilacijom u uvjetima požara, te da se do kraja 2007. godine donesu temeljna načela, odnosno opće prihvaćene preporuke za upravljanje ventilacijom cestovnih tunela u uvjetima redovnog pogona i požara.

U svjetlu navedenih činjenica, razvojno-projektni tim *Brodarskog instituta*, koji uključuje i vanjske suradnike, pod vodstvom autora je u proteklom razdoblju od 1997. godine, multidisciplinarno radeći na izradi svih faza projektne dokumentacije sustava ventilacije niza domaćih cestovnih tunela, zatim kreirajući scenarije i algoritme rada mogućih događaja u tunelima, te sudjelujući na provedbi i analizi brojnih požarnih testova i terenskih ispitivanja, dao okvire za definiranje jedne od mogućih strategija upravljanja sustavom uzdužne ventilacije tunela u uvjetima požara.

⁷ engl. Task 2: "Study Operation Strategy for Tunnel Ventilation"

U mnogim elementima nju je još potrebno razraditi i na odgovarajući način znanstveno-stručno obrazložiti, što je na znanstvenoj razini predmet ovog rada. Time bi, prema mišljenju autora, domaće znanstveno-stručne spoznaje iz ovog područja, na odgovarajući način doprinijele oblikovanju međunarodno prihvaćene operativne strategije upravljanja sustavom uzdužne ventilacije tunela u uvjetima požara. U tom smislu, autor kao predstavnik Hrvatske već aktivno sudjeluje u spomenutoj ekspertnoj grupi PIARC-a i doprinosi procesu oblikovanja operativnih strategija za različite tipove sustava ventilacije cestovnih tunela.

Temeljna postavka predmetne operativne strategije, počiva na pretpostavci da se i u požaru, premda izrazito stohastičkoj pojavi, mogu prepoznati i opisati⁸ određene faze njegovog razvoja. To nadalje implicira da se mogu unaprijed definirati i određene sekvencije rada ventilacijskog sustava koje, prema unaprijed utvrđenom algoritmu mogu pratiti razvoj požara, te neutralizirati ili minimalizirati njegovo štetno djelovanje na putnike i vatrogasno-spasilačke ekipe, kao i na strukturu i stabilnost građevine u cjelini. Time se ostvaruju preduvjeti da se spomenute karakteristične sekvencije rada sustava ventilacije prevedu u automatski mod rada, prema zadanom algoritmu upravljanja.

Uvažavajući gore navedene temeljne postavke operativne strategije, upravljanje sustavom uzdužne ventilacije u uvjetima požara, autor svodi na kombinaciju:

- **ručnog - daljinskog upravljanja**, kao posljedice niza okolnosti i različitih informacija koje operater posjeduje u danom trenutku, reagirajući pritom prema usuglašenim i usvojenim procedurama rada⁹
i
- **automatskog upravljanja određenim sekvencijama rada** (radnim operacijama) sustava ventilacije,

čime se bitno rasterećuje operater u kriznim situacijama, povećavaju njegove kognitivne sposobnosti u procesu odlučivanja, uz istovremenu veću pouzdanost, brzinu i točnost upravljačke akcije.

⁸ Pod pojmom "opisati" podrazumijeva se jasno prepoznavanje vremenskog slijeda određenih događaja i njihove uzročno-posljedične veze, bez potrebe da se to uvijek opiše odgovarajućim matematičkim izrazima ili na odgovarajući način kvantificira.

⁹ tzv. *engl.* "Emergency Response Plan"

2. METODOLOGIJA RADA

U ovom su radu predmet interesa samo cestovni tuneli s uzdužnom ventilacijom i znanstvena elaboracija odgovarajuće operativne strategije njenog rada u uvjetima požara. No, iako je vidljivo da je područje interesa suženo na vrlo specifičnu problematiku upravljanja sustavom ventilacije, ona je sastavni dio puno šireg područja koje se bavi problemima cjelovite zaštite i sigurnosti¹⁰ u cestovnim tunelima, a u okviru koje je zaštita od požara najznačajnije i stručno najopširnije područje. Stoga je neophodno u ovom radu dati i šire znanstvene i stručne okvire unutar kojih je smještena konkretna problematika rada, jer samo tako je moguće objektivno valorizirati njegove rezultate i spoznaje.

Također je potrebno naglasiti da je za uspješnost provođenja određene operativne strategije, osim njene stručne koherentnosti i utemeljenosti, potrebno i sinergijsko djelovanje različitih sudionika na terenu, kao što su operateri, putnici, pripadnici tehničke službe, vatrogasne i spasilačke ekipe, policija, te šira društvena zajednica, što je sve sadržano u jedinstvenom pojmu „upravljanja sigurnosno-zaštitnim mjerama¹¹“. Stoga će se u radu analizirati, iako u znatno manjoj mjeri i ovaj tzv. organizacijsko-sociološki faktor provedbe operativne strategije.

Prema tome, u ovom radu će se metodologija istraživanja očitovati u raznolikim aktivnostima, koje će predstavljati zasebna poglavlja, čvrsto povezana u jedinstvenu cjelinu, s osnovnim ciljem postepene sinteze spoznaja do razine njihovog uvezivanja u cjelovitu, konzistentnu operativnu strategiju rada sustava ventilacije (Slika 1.).

Spomenute aktivnosti u procesu oblikovanja predmetne operativne strategije su slijedeće:

- a) prikupljanje, analiza i prezentacija postojećih spoznaja iz područja istraživanja, s posebnim naglaskom na aktivnosti PIARC-a i status europskih istraživačkih projekata i studija iz područja zaštite i sigurnosti u tunelima;
- b) postupno oblikovanje operativne strategije rada ventilacijskog sustava u uvjetima požara, kroz slijedeće korake:

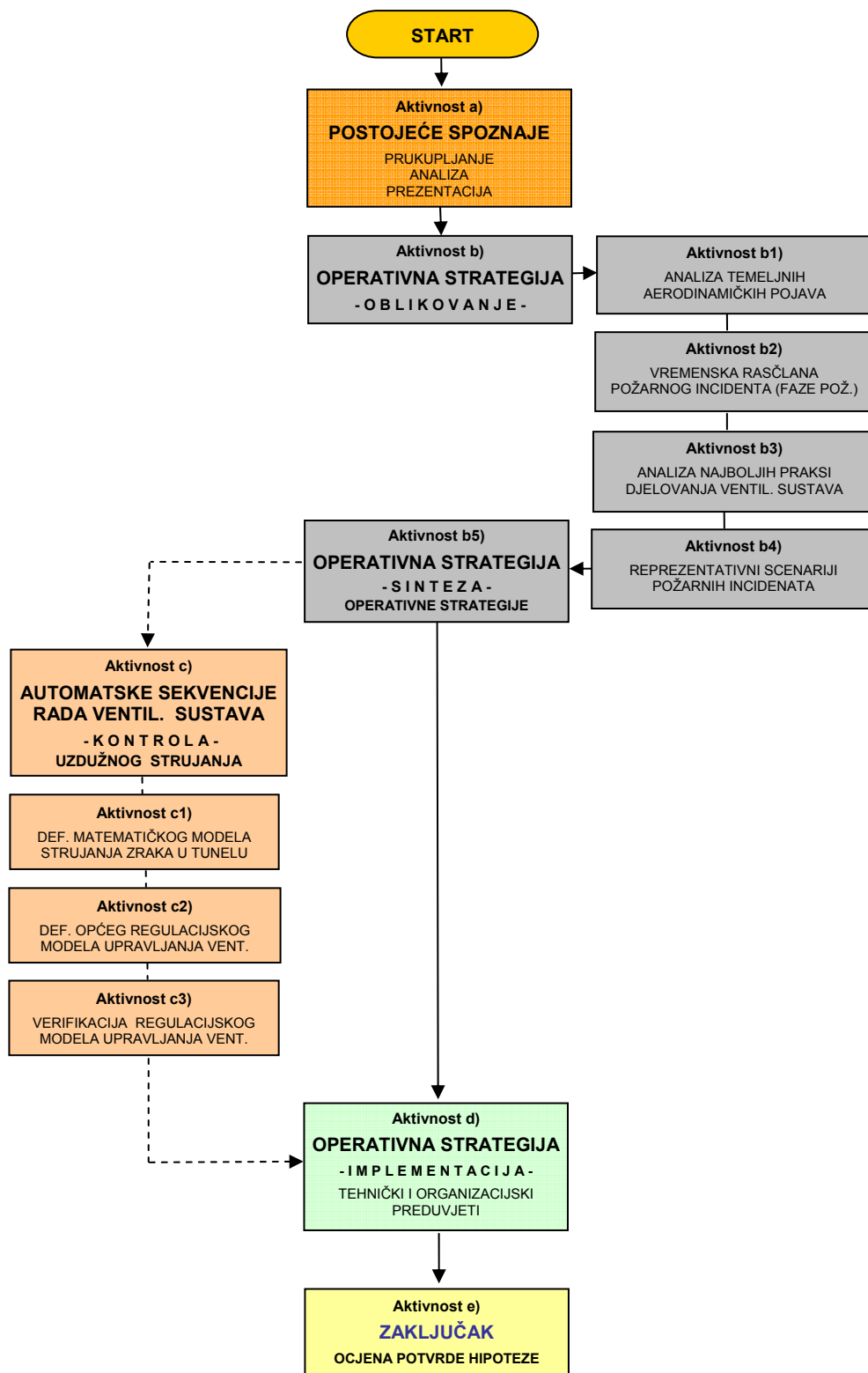
¹⁰ Radi se o području koje se u Anglo-saksonskoj literaturi opsuje izrazom: "Safety Strategies".

¹¹ Koristi se skraćeni izraz SMS od *engl.* "Safety Management System".

- b1) analiza temeljnih aerodinamičkih pojava koje se javljaju tijekom požarnog incidenta i utjecaj različitih varijabli na njihov tijek (meteorološki faktori, značajke geometrije tunela, požarno opterećenje i sl.), te njihova moguća interakcija sa različitim pogonskim stanjima sustava ventilacije → simulacija slike strujanja u CFD¹² modelima;
 - b2) podjela požarnog incidenta na karakteristične faze razvoja požara, obzirom na ulogu i vremenski slijed aktivnosti svih sudionika (operator, putnici i vatrogasne/spasilačke ekipe);
 - b3) analiza najboljih praksi (*engl.* „best practices“) djelovanja sustava uzdužne ventilacije u pojedinim fazama požarnog incidenta, preuzetih iz inozemne tehničke prakse i regulative;
 - b4) definiranje mogućih reprezentativnih scenarija akcidentnih situacija, obzirom na uvjete odvijanja prometa i zadanu geometriju tunela (čime se određuje mogućnosti evakuacije putnika, pristup vatrogasnih i spasilačkih ekipa i dr.);
 - b5) sinteza operativne strategije rada ventilacijskog sustava na temelju spoznaja iz prethodnih poglavlja, kroz izradu blok dijagrama vremenski i uzročno-posljedično vezanih operacija/postupaka → generički algoritmi upravljanja;
- c) oblikovanje i razrada karakterističnih automatskih sekvencija rada ventilacijskog sustava unutar prethodno definirane operativne strategije (b5), kroz slijedeće korake:
- c1) definiranje općeg matematičkog modela za slučaj strujanja zraka u tunelskoj cijevi;
 - c2) definiranje općeg regulacijskog modela za kontrolu uzdužnog strujanja, tj. smjera i brzine uzdužnog strujanja dima i vruće zračne mase, kao osnovnih aerodinamičkih parametara kojima se želi aktivno upravljati;
 - c3) verifikacija postavljenog numeričko-regulacijskog modela upravljanja ventilacijom na temelju računarske simulacije u specijalističkom programu → Simulink® ;

¹² *engl.* „**C**omputational **F**luid **D**ynamics“

- d) implementacija operativne strategije, s pretpostavkama za njenu uspješnu primjenu u realnim pogonskim uvjetima, s posebnim osvrtom na tehničke i organizacijske preduvjete → definiranje neophodnih promjena na razini tehničke opremljenosti tunela i organizacijske strukture službi tunela.
- e) zaključak rada, s ocjenom provedivosti postavljene hipoteze. Posebna pažnja posvetit će se identifikaciji onih područja operativne strategije koja zahtijevaju dopunsku znanstvenu elaboraciju → smjerovi daljnjih znanstvenih i eksperimentalnih istraživanja u predmetnom području.



Slika 1. Blok dijagram aktivnosti predviđenih u disertaciji

3. POSTOJEĆE SPOZNAJE IZ PREDMETNOG PODRUČJA

Djelovanje sustava ventilacije cestovnih tunela u uvjetima požara već je duži niz godina predmet interesa na različitim razinama, od pogonsko-eksploatacijske, projektantske do znanstveno-istraživačke. Razlog takvog širokog interesa leži prvenstveno u činjenici da je sustav ventilacije jedini koji se svojim radom može aktivno „suprotstaviti“ negativnim efektima požara u tunelu, te je njegovo djelovanje u požarnim uvjetima od izuzetne važnosti. Zbog toga je analiza djelovanja sustava ventilacije nezaobilazno poglavlje u gotovo svakoj sigurnosnoj studiji određenog cestovnog tunela ili cjelovite cestovne mreže na nacionalnoj razini [12], odnosno na međunarodnoj razini [13].

Nažalost, najveći dio teorijskog i eksperimentalnog rada iz ovog područja odnosio se na izučavanje i rješavanje specifične problematike zaštite od požara određenih tunela, te se njihovi rezultati mogu promatrati samo u tom ograničenom kontekstu, uz veliku opreznost prilikom generalizacije dobivenih rezultata.

Spomenuta eksperimentalna istraživanja uloge ventilacijskog sustava cestovnih tunela u uvjetima požara, kao i različitih specifičnih fenomena vezanih za požar u tunelima, obuhvaćaju modelska ispitivanja u laboratorijskim uvjetima i ispitivanja u naravi. Zbog izuzetno velikih troškova ispitivanja u naravi, o kojima će još biti riječi, obično prvi izbor do pojave modernih alata za numeričku simulaciju, bila su modelska ispitivanja na malim modelima. Mogućnost kvalitetne opservacije analizirane pojave, velika pouzdanost i mogućnost kontrole postavljene mjerne staze, kao i znatno manji utrošak financijskih sredstava i vremena potrebnog za ispitivanje, predstavljalo je argumente u korist modelskih ispitivanja. Najveći dio njih obavljen je u izotermnim uvjetima s tzv. „hladnim dimom“ [14; 15], međutim obavljana su ispitivanja i u neizotermnim uvjetima, s plamenicima malih toplinskih snaga (vidi detaljnije: *Ota* i *Atkinson* u Poglavlju 4.2.4.2., *Wu* i *Bakar* u Poglavlju 4.2.5.). Modelska ispitivanja sustava uzdužne ventilacije u izotermnim uvjetima, kao što je već spomenuto u Predgovoru, obavljena su i u *Brodarskom institutu*. Ispitivanja su imala za cilj vizualizaciju inicijalnog širenja dima unutar tunela, kao i određivanje utjecaja dvosmjernog prometa na efikasnost rada sustava uzdužne ventilacije tunela *Sveti Rok* [16]. Predmetna modelska ispitivanja detaljno su opisana u završnom izvješću [17], a dio ispitivanja koji se odnosi na specifično djelovanje sustava ventilacije u uvjetima požara analiziran je u ranije spomenutom magistarskom radu autora [18].

U pravilu je modeliranje strujanja obavljeno na malim modelima mjerila 1:20, odnosno 1:25, a sličnost je definirana *Froudeovom*, odnosno *Richardsonovom* značajkom. Međutim, i pored navedenih prednosti modelskih ispitivanja, složeni matematički aparat dimenzijske analize koji je neophodan za interpretaciju rezultata, kao i činjenica da potpuna sličnost modelirane pojave i realnog procesa nije moguća, znatno ograničavaju primjenljivost rezultata modelskih ispitivanja. Problem postizanja sličnosti donekle je ublažen prilikom ispitivanja na velikim modelima [19], međutim u tom slučaju i troškovi ispitivanja naglo rastu. Iz svih gore navedenih razloga, modelska ispitivanja su često samo prethodnica ispitivanjima u naravi.

Tradicija ispitivanja u naravi je prilično duga i pretežno je povezana sa značajnim programima izgradnje konkretnih tunela, s izradom sigurnosnih studija za potrebe različitih državnih agencija i tijela ili s realizacijom međunarodno financiranih znanstveno-istraživačkih projekata. Najznačajnija od spomenutih ispitivanja bila su ona u *Ofenegg* tunelu u Švicarskoj [20], 1965.; *Zwenberg* tunelu u Austriji [21], 1975., te PWRI ispitivanja u Japanu [22], 1980. Sva navedena ispitivanja provedena su sa standardiziranim tavama goriva¹³ i/ili manjim vozilima, dok je projekt EUREKA-499 [23] uključio realne požare tračničkih i cestovnih vozila, posebice teških teretnih vozila (HGV¹⁴). Navedena ispitivanja prvenstveno su se bavila fizikalno mjerljivim manifestacijama požara (prostorna raspodjela temperatura i dima, određivanje razvijene toplinske snaga požara i dr.), dok se utjecaj režima strujanja zraka eventualno uspostavljenog radom sustava ventilacije, kao i odgovarajuća dinamika procesa strujanja, nisu posebno razmatrali u navedenim ispitivanjima.

Recentna ispitivanja požara teških teretnih vozila u napuštenom tunelu Runehamar, u Norveškoj [24] (vidi komentar uz Tablicu 10.), obavljena su pod kontroliranim uvjetima odimljavanja, s pokretnim aksijalnim ventilatorima na vozilu. Iako ni u ovim ispitivanjima ventilacija nije bila primarni predmet interesa, u kasnijim analizama rezultata razmatrana je pojava povratnog strujanje dima (tzv. „*backlayering*“) u uvjetima požara s vrlo velikom toplinskom snagom (preko 200 MW!), što je od značaja za definiranje rada ventilacijskog sustava u fazi gašenja požara (vatrogasne intervencije).

¹³ engl. "pool fire" tests

¹⁴ engl. "Heavy Goods Vehicle"

I pored navedenih ograničenja u korištenju raznolikih rezultata provedenih ispitivanja, svakako je potrebno napomenuti saznanja o djelovanju ventilacijskog sustava u uvjetima požara proizašla iz opsežnih ispitivanja u *Memorial* tunelu, SAD, 1993. ÷ 1995. [25] (vidi detaljnije u Poglavlju 4.2.4.2.). Tom prilikom su ispitani svi poznati tipovi sustava ventilacije u realnom okruženju napuštenog tunela dužine oko 850 m (*Charleston, West Virginia*), s različitim toplinskim snagama požara (10÷100 MW), prema unaprijed određenim scenarijima rada ventilacijskog sustava. Brojne analize koje su proizašle iz ovih, do sada najkompleksnijih ispitivanja sustava ventilacije u uvjetima požara, poslužile su za generiranje brojnih koncepcija, scenarija i prijedloga operativnih strategija rada različitih sustava ventilacije. Jedna od važnih posljedica spomenutih ispitivanja bilo je prihvaćanje sustava uzdužne ventilacije, kao tehnički opravdanog i efikasnog sustava, a koji se do tada nije primjenjivao u tunelima SAD-a. Između ostalog, ova ispitivanja su poslužila i za validaciju CFD programa SOLVENT[®], koji se koristi u ovom radu.

Međutim, većina autoru poznatih i rezultatima dostupnih eksperimentalnih istraživanja, s iznimkom onih u *Memorial* tunelu, bavi se s konkretnim tunelom i njegovim pogonskim karakteristikama ili s ograničenim područjem djelovanja sustava ventilacije u uvjetima požara, kao npr. određivanjem kritične brzine odimljavanja, dužine povratnog strujanja dima, utjecajem vjetra na propagaciju dima [26] i sl. Izuzetno visoki troškovi spomenutih ispitivanja u realnim uvjetima, npr. 10 mil. USD za projekt EUREKA-499, te 40 mil. USD za program u *Memorial* tunelu, kao i znatan napredak simulacijskih tehnika, razlog su za preusmjeravanje napora istraživača na područje teorijskih razmatranja i analiza.

U radovima teorijskog karaktera iz promatranog područja, raznolikost problema s kojima se autori bave je, sukladno očekivanjima, mnogo veća. Razmatraju se, predlažu i najčešće simulacijama u nekom od priznatih CFD alata, analiziraju različita rješenja izvedbe ventilacijskih sustava i njihovog djelovanja u uvjetima požara [27; 28; 29]. U tom smislu prevladavaju radovi čiji predmet interesa je unaprjeđenje poprečne ventilacije i njenih inačica [30; 31] zbog povećanog interesa za analizom ovog tipa ventilacije, koji je bio ugrađen u tunelima zahvaćenim katastrofalnim požarima (vidi Tablica 1.). Neki radovi [32] razmatraju upotrebu uzdužne ventilacije kao mogućeg komplementarnog sustava postojećim, već ugrađenim sustavima poprečne ventilacije, s osnovnim ciljem efikasne kontrole uzdužnog strujanja. Spomenuti hibridni sustav ventilacije ugrađen je nakon obnove i modernizacije tunela *Mont Blanc*.

Međutim, i u području specifičnog interesa ove disertacije, a to je djelovanje uzdužne ventilacije i njenih inačica u uvjetima požara, prezentirani su radovi koji se bave mogućim scenarijima rada za slučaj primjene na konkretnom tunelu [33], odnosno sveobuhvatni radovi koji se bave utjecajem sustava uzdužne ventilacije na neki od ključnih parametara požara u tunelu. Primjer za to je doktorska disertacija *R.O. Carvela* [34], koja se bavi utjecajem uzdužne ventilacije na razvoj požara u tunelu i razvijenu toplinsku snagu.

Drugi problem u korištenju i interpretaciji dobivenih rezultata je neujednačenost metodologija i uvjeta pod kojima su provedeni različiti eksperimenti u naravi ili na modelima. Spomenuti problem korištenja brojnih rezultata promatranog fizikalnog parametra, dobivenih različitim metodološkim pristupima, pokušava se rješavati metodama iz područja teorije vjerojatnosti, koristeći *Bayesov* teorem. Kao primjer, u literaturi [35] se navodi njegova uspješna primjena kod određivanja vjerojatnosti moguće raspodjele toplinskih snaga požara, uvjetovanih različitim brzinama uzdužnog strujanja, odnosno različitim režimima rada sustava uzdužne ventilacije. Obzirom da se radi o problematici koja je od specifičnog interesa za ovaj rad, autor navodi najzanimljivije rezultate provedene analize, koji govore „... *da uzdužna brzina zraka u iznosu od 1,5 m/s nema značajan utjecaj na povećanje oslobođene toplinske snage požara osobnog vozila, u odnosu na prirodnu ventilaciju. Međutim, u slučaju požara teškog teretnog vozila (HGV), uzdužna brzina zraka u iznosu od 3,0 m/s ima značajan utjecaj na povećanje oslobođene toplinske snage požara, koja može biti i do 4x veća od one koja se oslobađa u uvjetima prirodne ventilacije. Za slučaj uzdužne brzine zraka od 10 m/s, oslobođena toplinska snaga požara može biti 10x veća od one koja se oslobađa u uvjetima prirodne ventilacije*“.

Navedeni zaključci jedan su od važnih argumenata za aktivnu kontrolu uzdužnog strujanja zraka u uvjetima požara, u svim njegovim fazama!

Međutim, djelovanje sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara, koje bi bilo opisano i razrađeno na razini operativne strategije s općom primjenom, teško je „prepoznati“ u mnogobrojnim radovima koji se bave zaštitom od požara u cestovnim tunelima. Naime, elaboracija odgovarajuće strategije upravljanja radom sustava ventilacije zahtjeva integrativni pristup i sintezu brojnih multidisciplinarnih znanja, što je primjerenije za izlaganje u naručenim studijama posebne namjene [36], koje nisu uvijek dostupne javnosti. Nadalje, u literaturi se često navodi i analizira specifična problematika, koja nije na razini strategijskog promišljanja, ali kao fragment može biti dio cjelovite strategije, npr. analiza evakuacijskih modela i sigurnost evakuacijskih koridora [37].

Autor je mišljenja da je nedostatak, odnosno neusklađenost relevantnih informacija iz ovog područja temeljni razlog PIARC-ove inicijative da se kroz rad grupe eksperata (vidi Predgovor) kreiraju i usuglase opće prihvatljive operativne strategije za osnovne tipove sustava ventilacije cestovnih tunela.

U vezi sa specifičnom ulogom sustava ventilacije u kontroli uzdužnog strujanja zraka i razdiobe dima, s posebnim naglaskom na probleme aktivnog upravljanja ventilacijom u uvjetima požara, što je ujedno i primarni interes ovoga rada, objavljeno je tek nekoliko dostupnih radova, od kojih se ovdje navode radovi *E. Jacquesa* [38; 39].

U ovom dijelu stručne problematike svakako će biti zanimljivi i rezultati velikih europskih istraživačkih projekata i tematskih mreža iz područja sigurnosti u tunelima, koji su u tijeku ili su netom završeni, a svi su u funkciji proklamirane EU politike konkurentnog i održivog razvoja [40]. Radi se o slijedećim projektima i njihovim predviđenim trajanjima:

- DARTS¹⁵ (2001.- 2004.) [41]
- UPTUN¹⁶ (2003.- 2006.) [42]
- SIRTAKI¹⁷ (2001.- 2004.) [43]
- Safe T (2002.- 2005.)
- Safe Tunnel (2001.- 2004.) [44]
- Virtual Fires (2001.- 2004.) [45]

Najbliži problematici ovog rada je projekt SIRTAKI koji je završen krajem 2004. godine i čiji rezultati su već ugrađeni kroz pilot projekte 4 europska tunela. Predmetni projekt predstavlja integralnu programsku podršku za upravljanje tunelom u kriznim situacijama, koristeći tzv. DSS (*engl.* **D**ecision **S**upport **S**ystem). Radi se o integraciji djelovanja svih sustava i infrastrukture tunela s ciljem da se pomogne operateru u upravljanju tunelom u kriznim situacijama. Pri tome sustav daje prognoze i vjerojatnost pojave određenih događaja, te pokreće predefinirane scenarije upravljanja tunelom. Program je generičkog oblika, s „otvorenom“ arhitekturom sustava, koja se naknadno prilagođava specifičnostima svakog konkretnog tunela na kojem se primjenjuje. Slični DSS modeli već su poznati u području vojne i nuklearne tehnologije.

¹⁵ akronim od *engl.* **D**urable **A**nd **R**eliable **T**unnel **S**tructure

¹⁶ akronim od *engl.* **U**pgrading of Existing **T**unnels

¹⁷ akronim od *engl.* **S**afety **I**mprovement in **R**oad & rail **T**unnels using **A**dvanced ICT and **K**nowledge **I**ntensive dss

4. OPERATIVNA STRATEGIJA RADA SUSTAVA VENTILACIJE

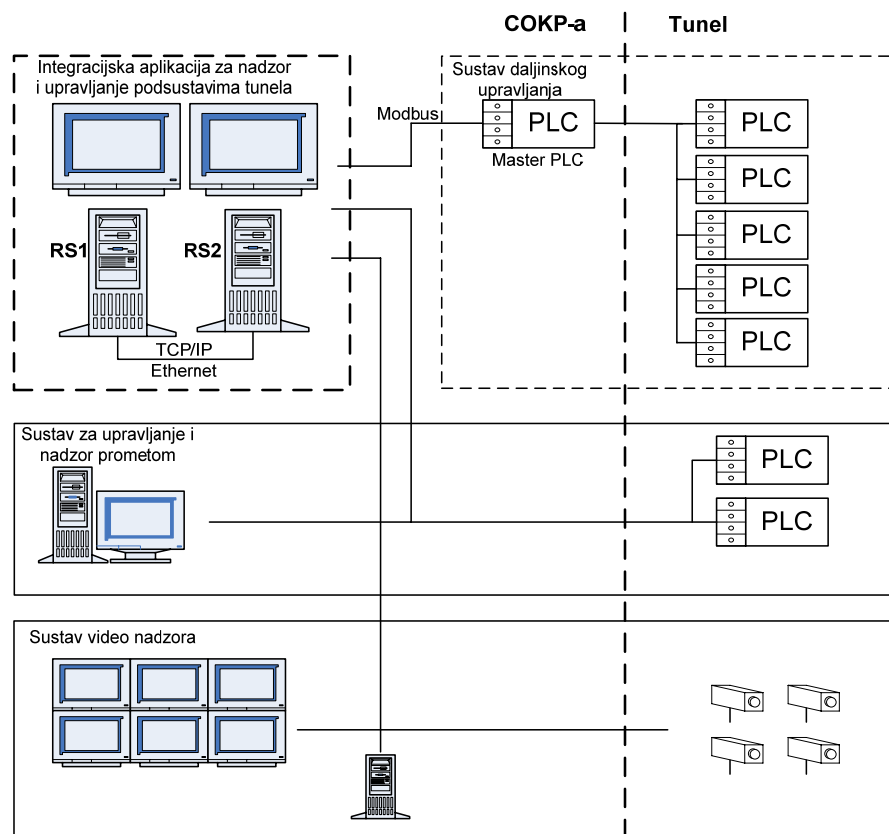
4.1. Uvod - oblikovanje operativne strategije

4.1.1. Tunel kao tehničko-tehnološka cjelina

Prometne tunele općenito, a tako i cestovne tunele ne možemo promatrati samo kao kapitalne građevinske objekte prometne infrastrukture, već oni predstavljaju i jedinstvenu tehničko-tehnološku (T-T) cjelinu. Ovdje se posebno stavlja naglasak na karakteristiku tunela kao tehnološke cjeline, jer u njemu uređaji, oprema i sustavi obavljaju raznolike procese sa složenom interakcijom, kojima je zajednički cilj sigurno, neometano i efikasno odvijanja prometa.

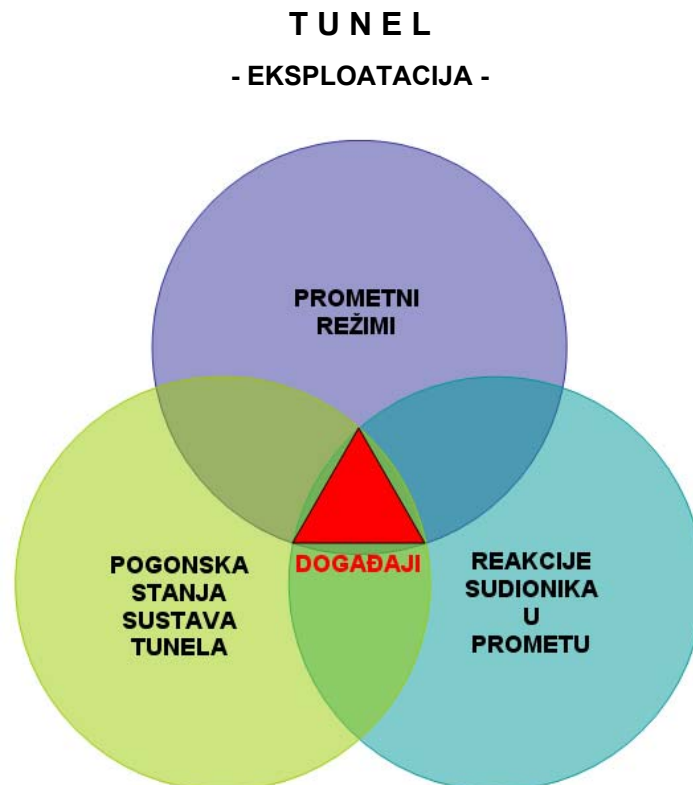
Karakteristike cestovnog tunela kao složene tehničko-tehnološke cjeline su slijedeće:

- veliki broj, različita pozicija i stupanj distribuiranosti (pod)sustava tunela;
- različita autonomija rada i upravljanja sustavima;
- visoki stupanj integracije i interakcije sustava;
- složena konfiguracija sustava upravljanja i nadzora (Slika 2.).



Slika 2. Shema funkcionalne i tehnološke pozicije sustava upravljanja i nadzora tunelom

Promet, kao specifična “tehnologija” sa visokim stupnjem implicitno sadržane stohastike, ima brojne pojavne inačice, tzv. „prometne režime“, koji na odgovarajući način trebaju biti “servisirani” od strane različitih sustava tunnelske infrastrukture. Interakcija gore spomenutih prometnih režima, odgovarajućih pogonskih stanja sustava tunela i reagiranje svih sudionika u prometu rezultira brojnim „događajima“ tijekom eksploatacije (Slika 3.).

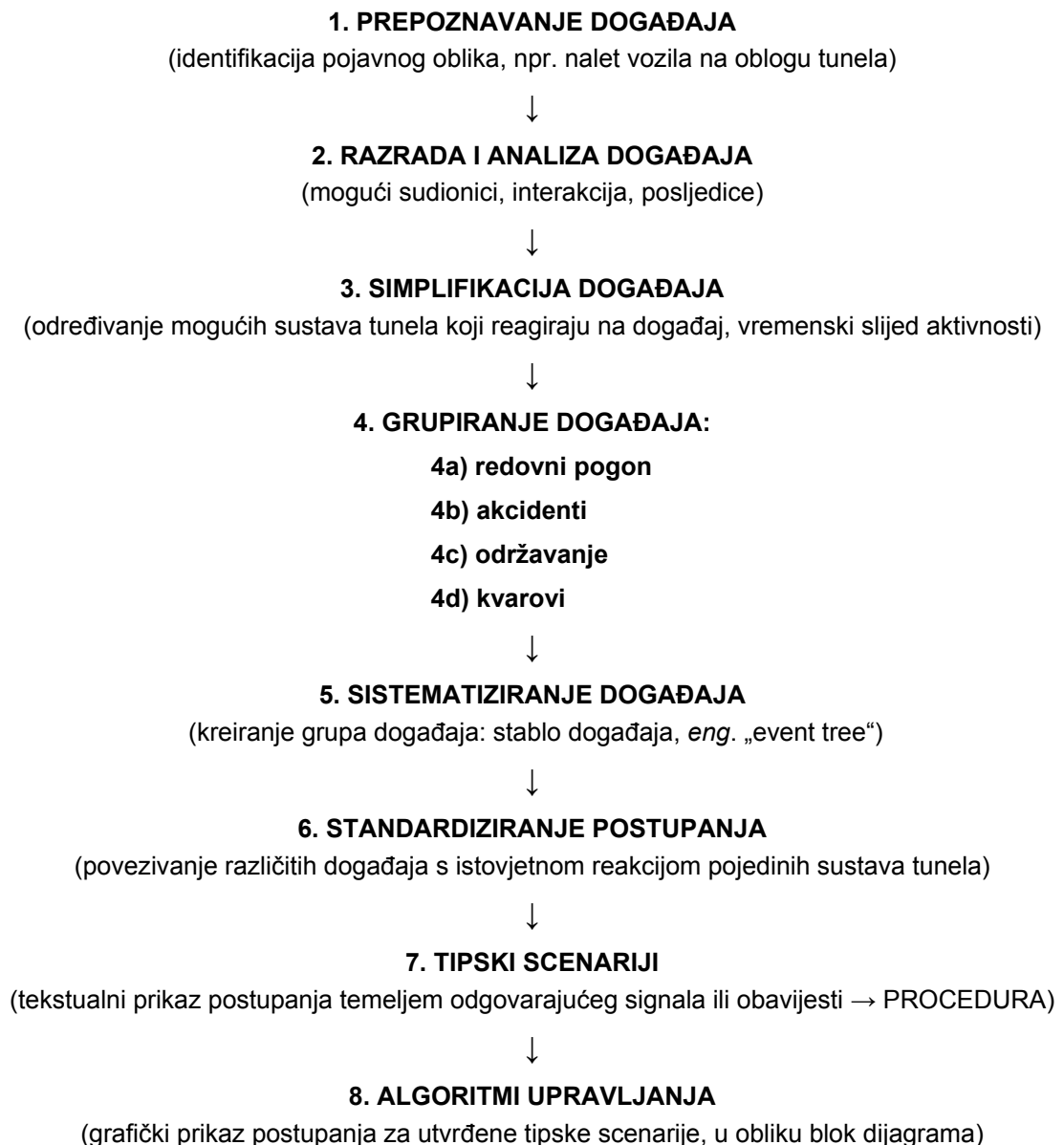


Slika 3. Generiranje događaja u interakciji ključnih faktora eksploatacije tunela

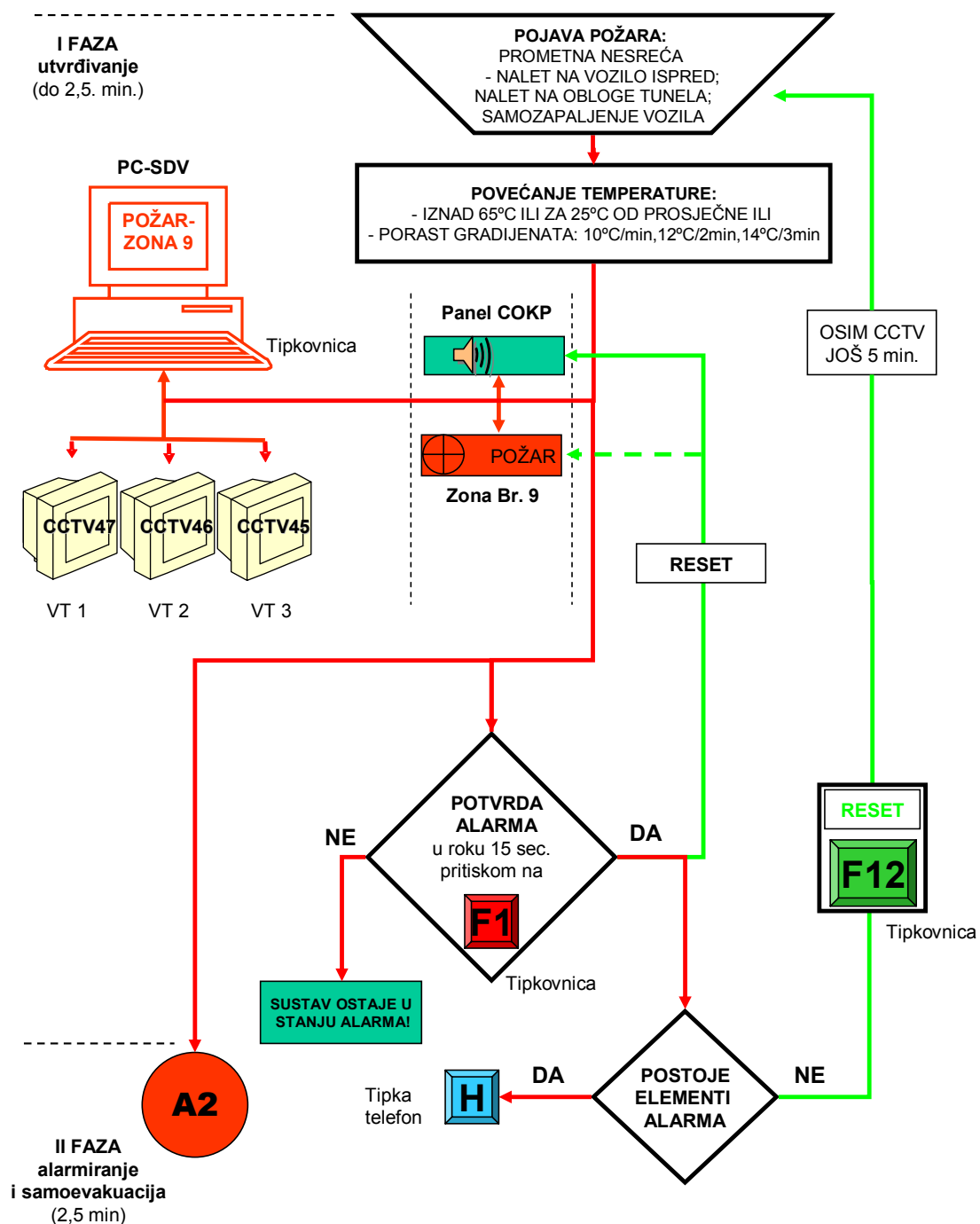
I pored svoje raznolikosti i brojnosti, događaji se mogu sistematizirati i svesti na prepoznatljive i simplificirane pojavne oblike.

- (!) Cilj spomenutog procesa simplifikacije i sistematizacije (grupiranja) mogućih događaja u tunelu je oblikovanje odgovarajućih tipskih scenarija upravljanja, koji predstavljaju unaprijed definirani slijed operacija, s čvrstim uzročno-posljedičnim vezama. Njih upravljački sustav provodi temeljem dobivenog signala ili obavijesti, kao reakciju na različite događaje u tunelu.

Svođenje širokog spektra različitih događaja u tunelu na simplificirane i sistematizirane grupe događaja, omogućava da se upravljanje tunelom, kao T-T cjelinom, a tako i njegovim pojedinim dijelovima i podsustavima, obavlja korištenjem tipskih tj. standardiziranih upravljačkih algoritama (za odgovarajuće primjere vidi Slike 4.a i 4.b). Postupak sistematizacije događaja, od njihove identifikacije do uspostavljanja tipskih scenarija i odgovarajućih upravljačkih algoritama, obavlja se u sljedećim fazama:

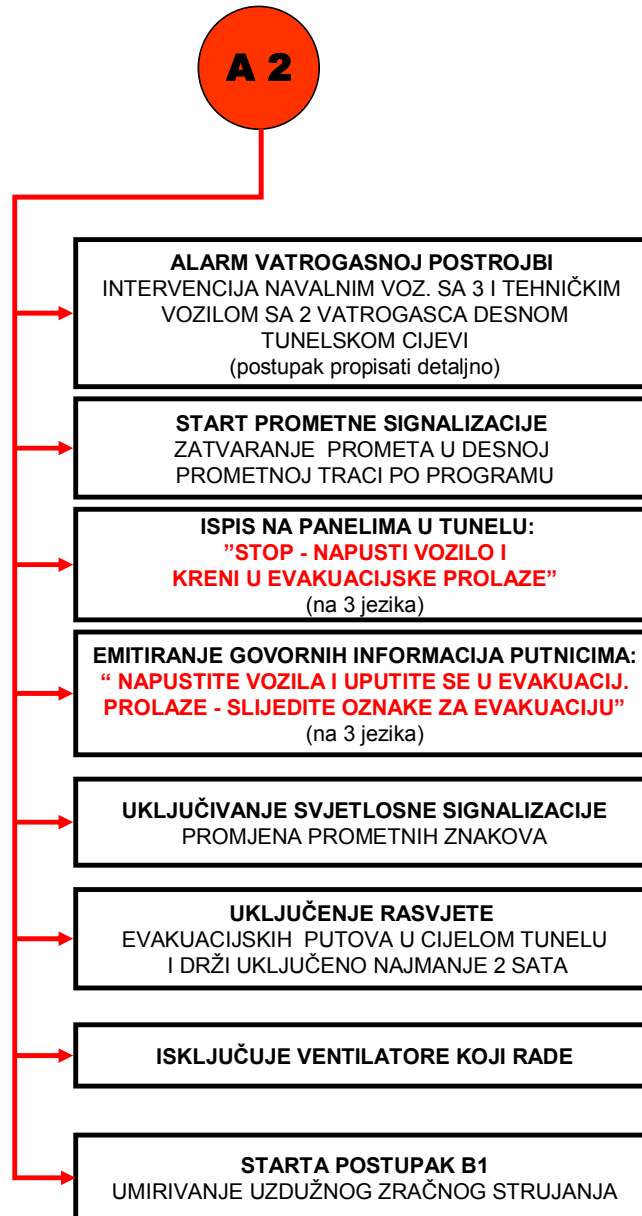


POSTUPANJE PO SIGNALU – OBAVIJEST br. 2

2. VATRODOJAVA – promjena temperature u **vatrodnoj zoni 9** – Alarm bez odgode izvršenja

Slika 4.a Algoritam postupanja za slučaj signala sa vatrodajnog senzorskog kabela - I FAZA
(Napomena: ova vrsta signala se tretira kao alarm bez odgode izvršenja!)

POSTUPAK – A 2 “POŽAR – 2”



Slika 4.b Algoritam postupanja u slučaju pokretanja požarnog alarma br. 2 – II FAZA
(*Napomena: pokretanje požarnog alarma tipa A2 podrazumijeva pojavu ozbiljnog požara u tunelu i intervenciju vatrogasaca s navalnim i tehničkim vozilom.*)

U skladu s prethodno iznesenim, može se dati sljedeća definicija tunela kao tehničko-tehnološke cjeline kojoj svakako treba težiti u svim fazama realizacije projektne zamisli, građenja, opremanja i eksploatacije tunela:

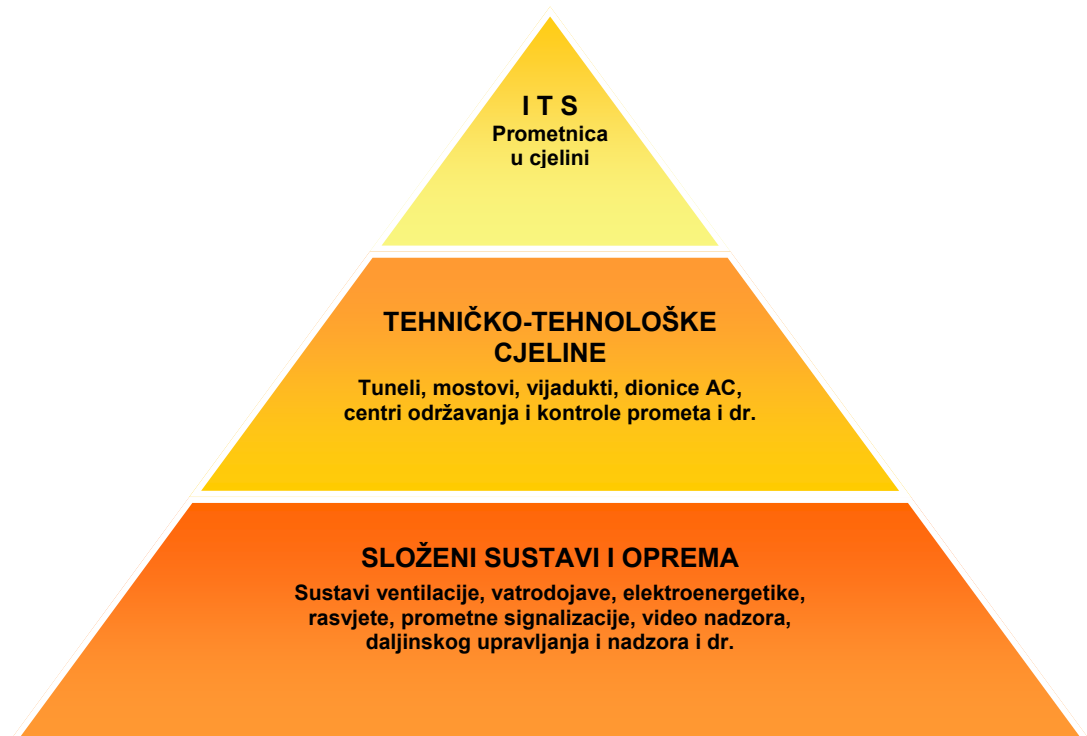
- (!) „Tunel sa svojim pojedinačnim sustavima, opremom i instalacijama tvori jedinstveni tehničko - tehnološki sustav koji koordiniranom i unaprijed utvrđenom promjenom svojih pogonskih stanja može odgovoriti na trenutne procese - događaje u svom okružju. Navedena promjena pogonskih stanja treba se odvijati na način da pogoduje sigurnom i efikasnom odvijanju prometa, povećanju sigurnosti i zaštiti svih sudionika u prometu, kao i očuvanju građevine u cjelini“.

Upravo postojanje „koordinirane i unaprijed utvrđene promjene pogonskih stanja, kojima se odgovara na različite procese - događaje u okruženju“ treba biti karakteristika svake od mogućih operativnih strategije, kao najviše razine upravljanja složenim sustavima i procesima. Pri tome, strategija upravljanja određenim tehničkim sustavom (npr. sustavom ventilacije cestovnog tunela) u akcidentnim situacijama ne podrazumijeva samo tehnički, izvedbeni aspekt upravljanja. Tome treba pribrojiti i ostale aspekte kao što su organizacijski, psiho-fiziološki, sociološki i brojni drugi, koji su u neposrednoj vezi sa promatranim sustavom i koji utječu na uspješnost provođenja predmetne strategije.

Općenito gledano, hijerarhija upravljanja tunelom kao složenim tehničko-tehnološkim sustavom, kreće od operativne strategije rada pojedinih vitalnih sustava, koji u sinergijskom djelovanju predstavljaju jedinstvenu strategiju upravljanja tunelom kao sastavnim dijelom prometnice (Slika 5.). Na vrhu promatrane piramide nalazi se sustav cjelovitog upravljanja prometnicom na temelju svih raspoloživih „on-line“ podataka, prognoza i baza podataka, poznat pod nazivom *Inteligentni prometni sustav*.¹⁸

Njime se u najopćenitijem slučaju objedinjuje upravljanje prometom i svim raspoloživim tehničkim sustavima prometnice, a razina integracije se kreće od pojedinih lokalnih dionica autoceste do upravljanja nacionalnim i transnacionalnim cestovnim mrežama.

¹⁸ engl. „Intelligent Transportation System“, skraćeno ITS.



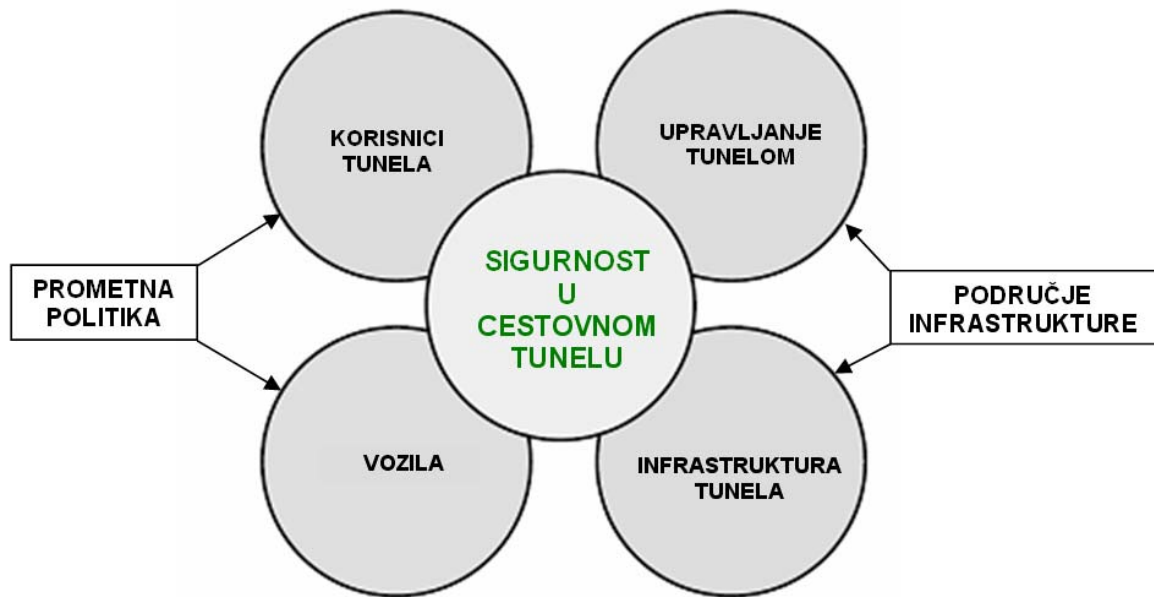
Slika 5. Hijerarhija integriranog upravljanja prometnicom (autocestom) u cjelini

Nažalost, uvezivanje rada svih raspoloživih sustava tunela u jedinstvenu operativnu strategiju, predstavlja složenu zadaću koja nadilazi rutinske projektantske vještine i znanja, te vrlo često zbog toga ostaje kao nedovršeni posao i dugo nakon dovršetka gradnje i puštanja tunela u pogon. Autor smatra da je jedan od glavnih razloga za to izostanak strateškog (dugoročnog) promišljanja na najvišim razinama integracije prometnih sustava, koje zahtjeva multidisciplinarni pristup. S druge strane, projektanti-specijalisti koji definiraju i osmišljavaju rad pojedinih sustava, instalacija i opreme obično ne poznaju arhitekturu upravljanja prometnicom u cjelini, te vrlo često primjenjuju, sa stajališta regulacije i funkcionalnog uvezivanja, nekompatibilne tehničke sustave.

Pojedini segmenti piramide u hijerarhiji upravljanja na Slici 5. predstavljaju samo virtualne granice, ali vrlo često i stvarne, nepremostive prepreke u promišljanju pojedinaca o ulozi pojedinih sustava i tehničko-tehnoloških (pod)cjelina u složenoj arhitekturi upravljanja prometnicom u cjelini. Skok iz jednog segmenta u drugi (nadređeni) predstavlja izuzetni napor i svodi se na osobno, profesionalno zanimanje pojedinca, a ne na sustavno promišljanje kako prometni sustav učiniti efikasnijim i sigurnijim u eksploataciji.

4.1.2. Faktori sigurnosti u cestovnom tunelu

Međuvisnost ključnih faktora sigurnosti u cestovnom tunelu prikazana je na Slici 6., prema opće prihvaćenoj klasifikaciji UNECE [46].



Slika 6. Ključni faktori sigurnosti u cestovnom tunelu

Kao što je vidljivo iz Slike 6., ključni faktori sigurnosti tunela grupirani su u dva glavna područja:

- **područje prometne politike**, koje obuhvaća ponašanje vozača u redovnim i incidentnim situacijama, obavješćavanje i odgovarajuću obuku vozača, politiku sankcioniranja prekršaja i devijantnih ponašanja u prometu, tehnološka unaprjeđenja vozila itd.
- **područje infrastrukture tunela u širem smislu**, koje obuhvaća sve one faktore koji utječu na pravilno i efikasno funkcioniranje tunela u organizacijskom i prometno-tehničkom smislu, kao što su geometrija tunela, broj cijevi, oprema i sustavi tunela (uključujući i ventilaciju), mogućnost nadzora (monitoringa) vitalnih parametara, efikasnost pogona, procedure i operativne strategije rada pojedinih sustava, planove postupanja u akcidentnim situacijama itd.

U nastavku ovog rada, predmet interesa sužit će se na oblikovanje operativne (pogonske) strategije rada sustava uzdužne ventilacije, kao vrlo važnog i specifičnog dijela cjelovite sigurnosne politike tunela. Naime, sustavi ventilacije cestovnih tunela, bez obzira na tip i izvedbu, spadaju u najznačajnije sustave koji svojom aktivnom ulogom participiraju u mjerama zaštite od požara.

Kada je riječ o gore spomenutom području infrastrukture tunela i njenoj ulozi u sigurnosnoj politici, potrebno je napomenuti da i ostali sustavi tunela moraju imati više ili manje razrađene scenarije djelovanja u uvjetima požara i sličnim incidentnim situacijama. Spomenuti scenariji po svojoj složenosti i širini zahvata u pravilu nemaju obilježja „operativne strategije“, ali definiraju rad mnogih sustava koji aktivno participiraju u operativnoj strategiji ventilacijskog sustava, te s njime čine neraskidivu cjelinu koja koordinirano djeluje u uvjetima požara (Tablica 2.). Navedenu tablicu treba uzeti u obzir kao opći prikaz poželjnog međudjelovanja pojedinih sustava tunela, koji se može razlikovati od tunela do tunela, prvenstveno u razini opremanja.

Neodgovarajući pristup u definiranju pogonskih scenarija, kvaliteti, montaži ili održavanju ovih sustava komplementarnih sustavu ventilacije, može znatno kompromitirati ili čak dovesti u pitanje provođenje i najbolje osmišljene operativne strategije upravljanja sustavom ventilacije. Ova činjenica se, prema mišljenju autora vrlo često zanemaruje u inicijalnim fazama realizacije projektne zamisli, te ju je veoma teško ispraviti u kasnijim fazama, a pogotovo u eksploatacijskim uvjetima. Npr. aktivno upravljanje uzdužnom brzinom zraka (dima) pomoću sustava ventilacije zahtjeva potpuno drugačiji kriterij za dimenzioniranje broja ventilatora od standardnog pristupa. Aktivno upravljanje uzdužnim strujanjem zraka pomoću sustava ventilacije zahtjeva u pravilu „bogatiju“ opremu kako u pogledu broja ventilatora, tako i u pogledu broja senzora u tunelu.

Tablica 2. Prikaz sustava (opreme) koji aktivno participiraju u operativnoj strategiji rada sustava ventilacije za slučaj redovnog pogona i požarnog incidenta

OPREMA I SUSTAVI TUNELA ▼	EKSPLOATACIJSKI SCENARIJI			
	Redovni pogon	Akcidentni događaji ¹⁹ (POŽAR)	Kvarovi	Održavanje
VENTILACIJA	■	■	□	□
VATRODOJAVA	O	■	O	O
SUSTAV UPRAVLJANJA I NADZORA	■	■	□	□
VIDEO NADZOR	□	■	□	□
RASVJETA	□	□	□	□
PROMETNA SIGNALIZACIJA	□	■	□	□
RADIO SUSTAV	O	□	O	O
OZVUČENJE	O	□	O	O
TELEFONSKO - POZIVNI SUSTAV (TPS)	O	□	O	O
BEZPREKIDNO NAPAJANJE (UPS)	O	□	O	O
ELEKTRO – ENERG. NAPAJANJE	■	■	□	□
HIDRANTSKA MREŽA	O	□	O	O
SENZORI BRZINE I SMJERA STRUJANJA	■	■	□	□
CO/E SENZORI	■	■ ²⁰	□	□

Legenda

- postoji razrađeni scenarij rada sustava
- postoji razrađeni scenarij rada sustava, aktivno participira u operativnoj strategiji ventilacije
- O sustav je u "stand by" funkciji, bez aktivnog djelovanja

¹⁹ Iako je najčešći i najvažniji, požar predstavlja samo jedan od mogućih akcidentnih događaja (npr. automobilska nesreća bez požara, razlijevanje zapaljivih tekućina, potres i sl.).

²⁰ Senzori vidljivosti (ekstinkcije) mogu biti stavljeni u funkciju "ranog" alarma pojave požara zbog promptne registracije dima. Međutim u tom slučaju je potrebno povećati njihov broj i raspolagati s odgovarajućom programskom podrškom.

4.2. Analiza temeljnih aerodinamičkih pojava

4.2.1. Uvodne napomene

Djelovanje sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara očituje se prvenstveno na upravljanje raspodjelom dima unutar tunelske cijevi, s ciljem da se osiguraju što povoljniji uvjeti putnicima za evakuaciju, a vatrogasno-spasilačkim ekipama za pravovremeni pristup unesrećenima i efikasno gašenje požara. Pri tome je potrebno naglasiti da kod primjene uzdužne ventilacije glavna tunelska cijev, koja služi kao jedini evakuacijski put do ulaska putnika u sigurne prostore, ujedno predstavlja i prostor za transport dima do portala, te je stoga od iznimne važnosti razdiobu dima na odgovarajući način kontrolirati djelovanjem sustava ventilacije. Pod pojmom "kontrole raspodjele dima" podrazumijeva se mogući utjecaj sustava ventilacije na dva ključna parametra: smjer i brzinu strujanja vruće zračne mase i dima (u daljnjem tekstu „dima“).

Kao što je već spomenuto u prethodnom tekstu, fenomenologija raspodjele dima unutar tunelske cijevi podrazumijeva raznolike aerodinamičke pojave i efekte, koji nastaju interakcijom dima sa djelovanjem ventilacijskog sustava, odnosno utjecajem vanjskih meteoroloških parametara, kao i građevinske konfiguracije i unutarnje strukture tunela. Poznavanje navedenih aerodinamičkih pojava i efekata, koji su u izravnoj vezi s termodinamičkim zakonitostima požarnog procesa, presudno je za oblikovanje efikasne operativne strategije rada ventilacijskog sustava u uvjetima požara. Kao temeljne aerodinamičke pojave i veličine navode se:

- a) stratifikacija dima;
- b) odimljavanje i u vezi s njim tzv. „kritična brzina“;
- c) povratno strujanje dima, tzv. „backlayering“

U predstojećoj analizi navedenih aerodinamičkih pojava, neće se promatrati cjelokupni fizikalni mehanizmi njihovog nastajanja, niti izlagati složeni matematički aparat koji ih u pravilu opisuje za slučaj idealiziranih stanja. Pažnja će stoga biti usmjerena na interakciju navedenih pojava i ventilacijskog sustava, s ciljem da se prepoznaju i definiraju pogonska stanja sustava ventilacije koja maksimalno pogoduju razvoju i očuvanju onih aerodinamičkih pojava i pratećih efekata koji omogućavaju sigurnu i efikasnu evakuaciju putnika i pravovremeno gašenje požara.

Izvor podataka za analizu su brojna terenska ispitivanja sustava ventilacije i požarni testovi, provedeni u Hrvatskoj na nizu tunela, pri čijem oblikovanju i provedbi je autor aktivno sudjelovao, zatim podaci iz zemalja članica PIARC-a, te raspoloživi podaci iz znanstveno-stručne literature. Nadalje, efekti pojedinih aerodinamičkih pojava, koje su predmet predstojeće analize, potkrijepljeni su i objektivizirani rezultatima numeričkog modeliranja, koristeći suvremeni CFD programom SOLVENT[®].

4.2.2. Numeričko modeliranje aerodinamičkih pojava

Simulacija različitih aerodinamičkih pojava navedenih u Poglavlju 4.2.1., koje su predmet analize u ovom radu, obavljena je s gore navedenim specijaliziranim CFD alatom, posebno razvijenim za 3D modeliranje strujanja zraka i dima u cestovnim tunelima. Pored korištenog SOLVENT[®]-a, za spomenuto područje primjene pogodni su još neki CFD alati, kao što su PHOENICS[®], JASMINE[®], FLUENT[®] i drugi.

4.2.2.1. Uvjeti simulacije

Pored općenitih zajedničkih svojstava spomenutih CFD alata, svaki od njih ima i svoje specifičnosti koje je potrebno uzeti u obzir ukoliko se želi pravilno interpretirati rezultate provedenih simulacija. Za potrebe ovog rada analiza aerodinamičkih pojava provedena je za požare toplinske snage od 30 i 100 MW (vidi Prilog 1), a uvjeti simulacije [47] bili su sljedeći:

Vrsta simulacije :	Tranzijentna (ovisna o vremenu)
Tip ventilacije:	Uzdužna ventilacija
Ventilatori:	8 baterija (ventilatori su izvan pogona), strujanje zraka je prirodno
Gustoća:	Varijabilna (Napomena: gustoća nije konstantna tijekom simulacije, već se izračunava za svaki kontrolni volumen posebno u ovisnosti o temperaturi)
Dim:	Postoji (Napomena: dim je definiran kao maseni udio produkata izgaranja u ukupnoj masi zraka, a sama količina dima se izračunava iz potrošnje goriva u području požara i stehiometrijskog omjera zraka i potrošenog goriva)
Zračenje:	Definirano kao 30% od ukupno razvijene toplinske snage (HRR)

Požar:**~ 100 MW**

Dimenzije (D x Š x V): 12,2 x 2,5 x 4,75 m

Ogrjevna moć goriva: $42,6 \times 10^6$ J/kg

Efikasnost izgaranja: 0,9

Potrošnja goriva: 2,59 kg/s

~ 30 MW

Dimenzije (D x Š x V): 3,5 x 2,5 x 3,4 m

Ogrjevna moć goriva: $42,6 \times 10^6$ J/kg

Efikasnost izgaranja: 0,9

Potrošnja goriva: 0,79 kg/s

(**Napomena:** model ne simulira proces izgaranja! U modelu je požar prikazan kao toplinski izvor određenog volumena preko kojeg se u sam model uvodi toplinska energija i dim. Količina razvijene toplinske energije definira se potrošnjom goriva i njegovom ogrjevnom moći, dok se dim definira iz potrošnje goriva i stehiometrijskog omjera zraka i goriva).

Simulac. parametri:

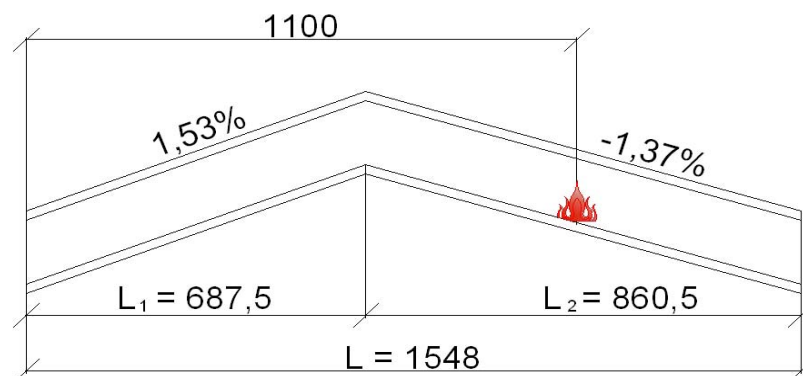
Broj koraka tranzijentne simulacije: 5

Trajanje jednog koraka: 120 s (2 min)

Broj iteracija unutar svakog koraka: 300

4.2.2.2. Geometrija objekta

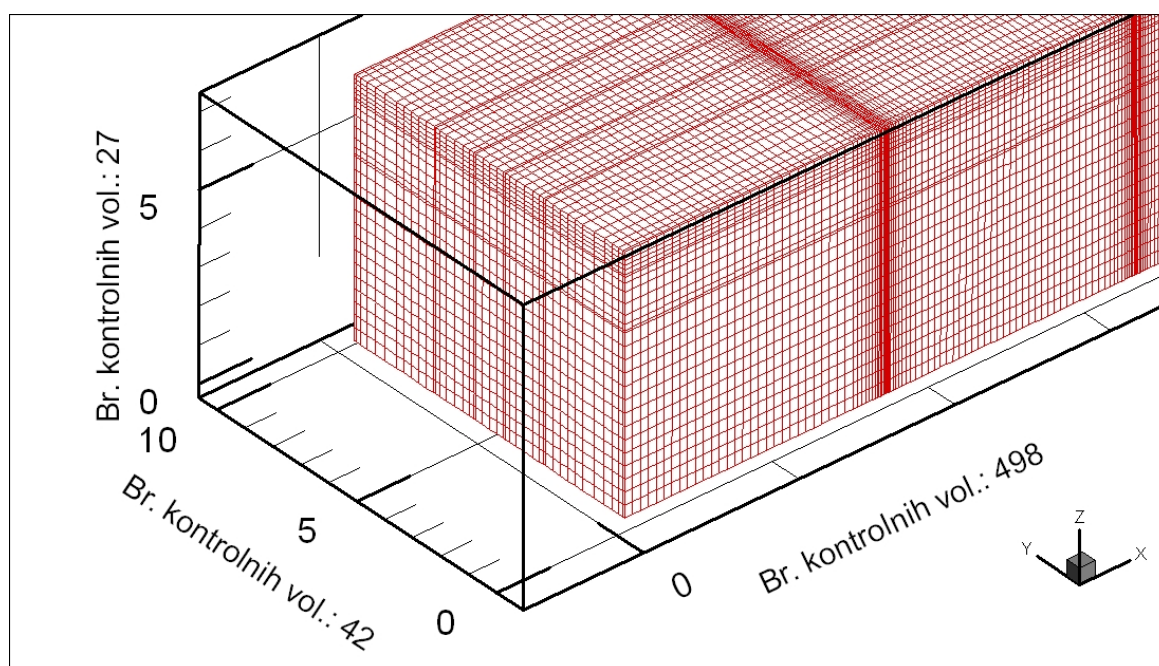
Simulacija je provedena za geometriju tunela Brinje (Hrvatska), s karakteristikama uzdužnog presjeka prikazanog na Slici 7.

**Slika 7.** Lokacija požara za potrebe CFD simulacije

4.2.2.3. Diskretizacija objekta

Odabrani broj kontrolnih volumena: 564.732
Odabrana rezolucija mreže ($x \cdot y \cdot z$): 498 x 42 x 27

Maksimalni broj kontrolnih volumena: 900.000
Maksimalna²¹ rezolucija mreže: 600 x 50 x 30



Slika 8. Diskretizacija objekta modeliranja za potrebe CFD simulacije
(karakteristični isječak mreže)

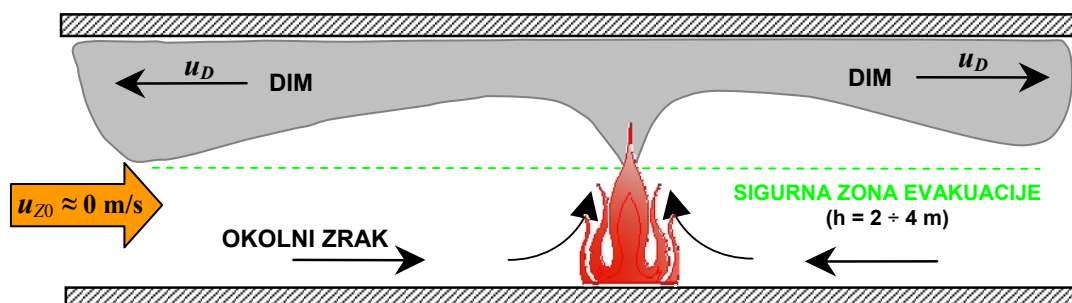
²¹ Ovisno o tipu simulacije, upotrebjeno: "SOLVENT_Large"

4.2.3. Stratifikacija dima

Stratifikacija dima predstavlja pojavu uzgonskog strujanja dima prema stropu tunela, uvjetovanog razlikom gustoće vrućeg dima i okolnog hladnijeg zraka ($\rho_D \ll \rho_Z$), te u idealnim uvjetima, kada je uzdužna brzina zraka $u_Z = 0$, ravnomjerno slojevito širenje dima uz strop, simetrično na obje strane od mjesta požara (Slika 9.).

Brzina širenja, tj. propagacije dima (u_D) ovisit će u izvjesnoj mjeri od veličine požara, međutim za ozbiljne²² požare radi se o iznosu reda veličine od 2 m/s i više [48]. U početnoj fazi požara, kod izraženog efekta stratifikacije, jasno je vidljiva granica dima i zračne mase koja se nalazi ispod stratificiranog sloja, uz postojanje potpuno različite dinamike gibanja, tj. različitih vektora brzine gibanja dima i okolne zračne mase.

Stoga se može reći da se u početnoj fazi požara, pri izraženoj stratifikaciji, dim i okolni zrak ponašaju kao dvije odvojene plinske faze koje se ne miješaju (karakteristično za „2 - zonske“ modele transporta dima!).



Slika 9. Stratifikacija dima i simetrična raspodjela u početnoj fazi požara
(niveleta tunela= 0 %, brzina uzdužnog strujanja zraka= 0 m/s, ventilacija isključena)

Proces stratifikacije dima, prikazan kao skica na uzdužnom presjeku tunela (Slika 9.), znatno kvalitetnije vidljiv je na prostornom prikazu širenja dima tijekom modelskih ispitivanja tunela *Sveti Rok*, obavljenih u *Brodarskom institutu* u izotermnim uvjetima (Foto 1 i 2). Uvjeti provedbe spomenutih ispitivanja obrazloženi su u Poglavlju 4.2.4.2.

²² U izvornom tekstu ne navodi se vrijednost požarnog opterećenja, ali pretpostavlja se da se radi o požarima toplinske snage ≥ 20 MW. Kod požara cisterni s gorivom navedena brzina širenja dimnog sloja pretpostavlja se da može iznositi i preko 4 m/s.

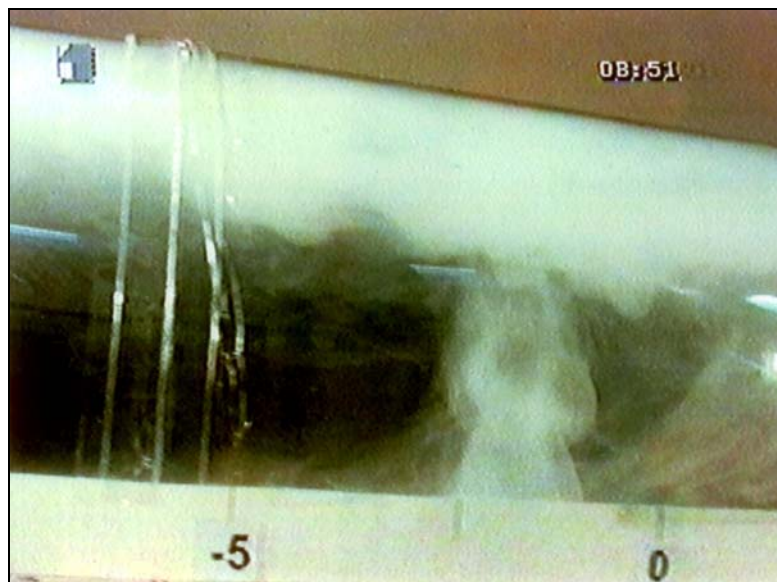


Foto 1: Razvoj dima i simetrično grananje u zoni stratifikacije
(Izvor: modelska ispitivanja ventilacije tunela Sveti Rok, 1998.; BI)

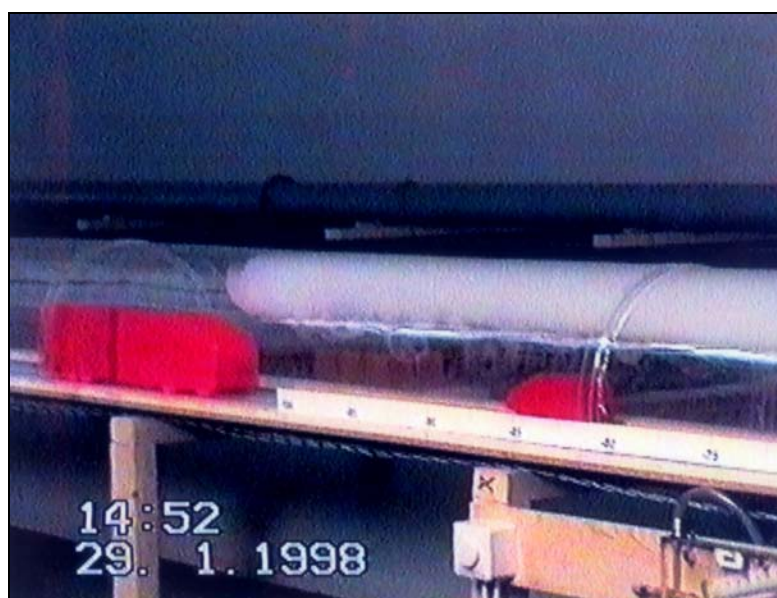
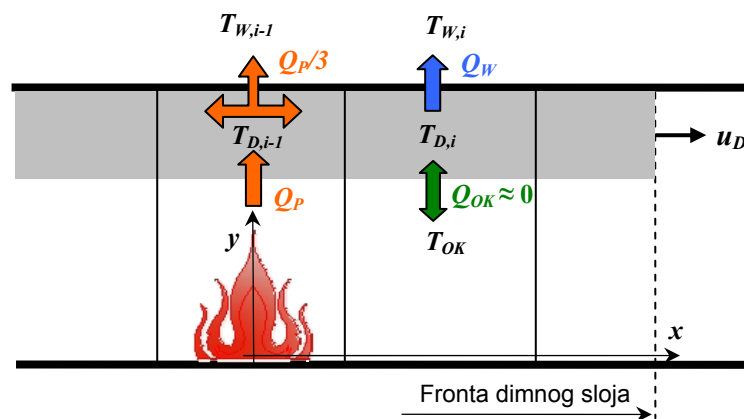


Foto 2: Izraženo stratifikacijsko širenje dima u jednom smjeru (lijeva grana)
(niveleta tunela= 0 %, brzina uzdužnog strujanja zraka= 0 m/s, ventilacija isključena)
(Izvor: modelska ispitivanja ventilacije tunela Sveti Rok, 1998.; BI)

Daljnijim širenjem dima uzduž tunela, dolazi do njegovog hlađenja uvjetovanog konvekcijom i zračenjem prema hladnijim stjenkama tunela, tako da s vremenskim tijekom i udaljenošću od mjesta požara dolazi do povećanja visine (debljine) stratificiranog sloja i usporavanja njegovog širenja, da bi naposljetku došlo do ispunjenja cjelokupnog presjeka tunela s dimom.

U toj fazi, koja u pravilu nastupa unutar vremena od 10 minuta nakon pojave požara, dim i okolni zrak predstavljaju homogenu mješavinu, bez vidljive granice pojedinih komponenti. Međutim i pored stvaranja naizgled homogene mješavine, neki autori [49] navode da rezultati mjerenja temperatura i brzina u odgovarajućim točkama poprečnog presjeka pokazuju značajne neujednačenosti, što ukazuje na preostale posljedice stratifikacije, iako ona više nije vizualno prepoznatljiva za promatrača.



Slika 10. Opći 1-D model širenja dima u fazi stratifikacije

Jedan od mogućih modela širenja dima je 1-D model prikazan na Slici 10. Iako predstavlja znatnu simplifikaciju realnog procesa, ipak omogućuje njegovu analizu na temelju praćenja promjena temeljnih značajki procesa. Pri tome se misli na značajke kao što su distribucija temperature i pripadajuće brzine širenja dimnog sloja uzduž tunela (osi x), koje se proračunavaju sukcesivno za svaki segment i . Navedeni 1-D modeli (npr. programi „Rabbit“, „Sprint“ i dr.) su puno brži i praktičniji za rad od složenih CFD modela. No, i dalje kao najveća nepoznanica ostaju pojave izmjene topline i promjene impulsa zračne mase u neposrednoj zoni požara, kojima se ovaj model ne bavi. Mjesto pojave požara pretpostavlja se kao točkasti (diskretni) izvor topline i dima, čime se eliminiraju nesigurnosti i nepoznavanje fizikalnih procesa u neposrednoj zoni požara.

Toplinska „izdašnost“ izvora požara (Q_P), definirana kroz „oslobođenu toplinsku snagu“, ²³ predaje se okolini na sljedeći način:

- izravno zračenjem na stjenke (oblogu) tunela u neposrednoj blizini požara;
- izravno toplinskim transferom (tzv. „advekcijom“) na zračnu masu u horizontalnom gibanju, u konkretnom slučaju misli se na stratificirani dimni sloj.

Ukoliko se zadržimo na termodinamičkom aspektu promatranog jednodimenzionalnog modela, može se konstatirati da je izmjena topline zračenjem u neposrednoj blizini požarne zone vrlo izražena, te se iskustveno uzima da iznosi 1/3 od ukupno oslobođene topline požara. Ostatak oslobođene topline požara se advektivnim mehanizmom prijenosa topline prenosi na dim. Argument za ovakvu tvrdnju o prostornoj distribuciji požarnog opterećenja nalazi se u izrazu za srednju temperaturu mješavine zraka/dima, neposredno niz-strujno od mjesta požara [50]:

$$T_m = \frac{\frac{2}{3} Q_P}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A \cdot u_0} + T_0 \quad (1)$$

Potrebno je upozoriti da se u gornjem slučaju ne radi o stratifikacijskom strujanju dima, te se izraz (1) za određivanje srednje temperature zraka/dima ne može primijeniti na izračun temperature stratificiranog dimnog sloja!

Izmjena topline dimnog sloja sa hladnijim stjenkama tunela opisana je izrazom [49]:

$$Q_w = \frac{4A}{D_h} \cdot \Delta x \cdot \left(\alpha \cdot (T_D - T_w) + \varepsilon \cdot \sigma (T_D^4 - T_w^4) \right) \quad (2)$$

Navedeni izraz treba rješavati postupno, za svaki segment (kontrolni volumen) tunela. U njemu je sadržana komponenta konvektivnog prijelaza topline i komponenta izmjene topline zračenjem, uz pretpostavku da se izmjena topline (Q_{OK}) dimnog sloja sa donjim slojem okolnog zraka može zanemariti obzirom na znatno manje temperaturne razlike i manje vrijednosti prijelaza topline na granici ovih zona, u usporedbi s onima koji se pojavljuju na plohi razgraničenja dimnog sloja i stjenke tunela. Navedena pretpostavka karakteristična je za tzv. „2 - zonske“ modele simulacije širenja dima [51].

²³ U literaturi se pojavljuje kao skraćeni izraz TRR, *engl.* „**T**hermal **R**elease **R**ate“, odnosno HRR, *engl.* „**H**eat **R**elease **R**ate“

Brzina fronte dimnog sloja, uvjetovana razlikom temperatura vrućeg dima i hladnije zračne mase koja se nalazi ispod, izražena je sljedećim izrazom [52]:

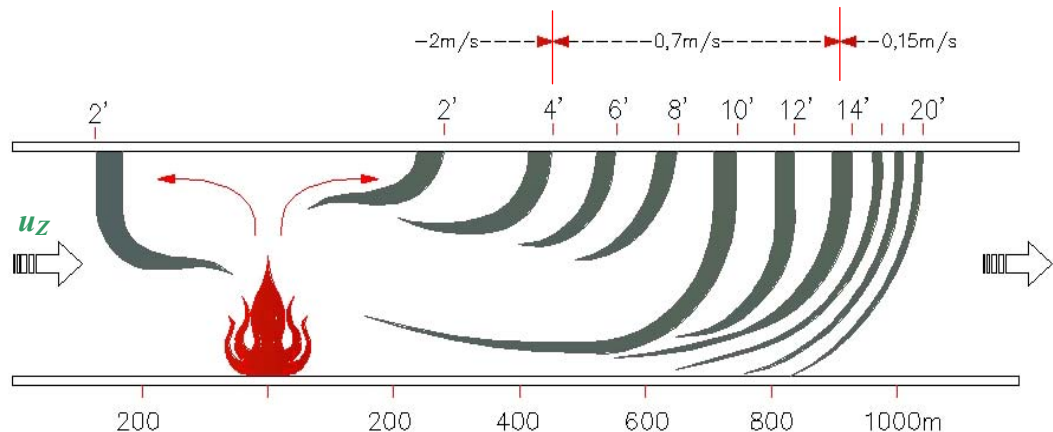
$$u_D = k \cdot \sqrt{g \cdot D_h \frac{T_D - T_0}{2 \cdot T_D}} \quad (3)$$

Faktor k je na temelju eksperimenata određen, prema *Fanneløpu* [53], u granicama od 0,5 do 0,67 (tj. $1/\sqrt{2}$). Obzirom da u izrazu (3) brzina fronte dima eksplicitno ne ovisi o niveleti (nagibu) tunela, što je na prvi pogled zbunjujuće ako se uzme u obzir poznati „efekt dimnjaka“, za pretpostaviti je da je ta ovisnost sadržana u empirijskom faktoru k . No, neki autori [54] potvrđuju da je spomenuta brzina fronte dima tek neznatno ovisna o niveleti tunela. Za požare s toplinskim učinkom od 20 MW u literaturi se navodi [49] vrijednost eksperimentalno utvrđene brzine fronte dima od 2,2 m/s, a za požare od 50 MW ta vrijednost iznosi 4,0 m/s.

Prethodno opisani scenarij stratificirane raspodjele dima u tunelu veoma je rijedak i predstavlja idealiziranu situaciju, jer je uzdužna brzina strujanja zraka u tunelu u pravilu $u_z \gg 0$, zbog utjecaja vozila (tzv. „efekt klipa“), rada ventilacijskog sustava i/ili inercijskog gibanja zračne mase, te razolikih meteoroloških efekata. Prema tome, može se zaključiti da je stratifikacija dima vrlo nestabilna fizikalna pojava temeljena isključivo na razlici gustoća susjednih plinskih smjesa (dima i zraka), koja se u praksi javlja samo pod strogo kontroliranim uvjetima.

No, iako u pravilu stanje na terenu deformira idealiziranu sliku stratifikacije, njoj treba težiti aktivnim djelovanjem sustava ventilacije na zračnu masu u gibanju, zbog sljedećih razloga, tj. pozitivnih efekata:

- a) Ispod sloja stratificiranog dima formira se tzv. „sigurna zona“ pogodna za neometanu evakuaciju putnika (vidi Foto 5). Ispitivanja [55] s benzinskim lokvama, kao standardiziranim izvorima požara, pokazala su da ovisno o srednjoj brzini strujanja zraka u tunelu (pretpostavlja se da je $u_z \leq 1,5$ m/s), zona visine 2 do 4 m ostaje nezadimljena u trajanju od cca 4 do 8 min (Slika 11.). U navedenom vremenu potrebno je obaviti evakuaciju putnika u sigurnu zonu, tj. u odgovarajuća sigurna skloništa, u paralelni servisni tunel, drugu tunelsku cijev ili na otvoreni prostor pomoću evakuacijskih okana.



Slika 11.* Širenje dima u vremensko – prostornom prikazu [55]
(*dopuna autora)

Zanimljivo je napomenuti da smo tijekom provedbe brojnih požarnih testova u recentno sagrađenim domaćim tunelima zapazili da i u slučaju kada je uzdužna brzina zraka na početku požarnog testa znatno veća od optimalnog područja brzina (0 – 1,5 m/s), što kao posljedicu ima turbulentno strujanje dima/zraka, te ispunjenje cjelokupnog poprečnog presjeka dimom (Foto 4), naknadnom intervencijom (npr. aktivnim djelovanjem sustava ventilacije) i konzekventnim smanjenjem uzdužne brzine zraka u područje ispod 1,5 m/s, dolazi do pojave tzv. “re-stratifikacije”, odnosno ponovnog uspostavljanja stratificiranog strujanja. Ovo veoma važno, u praksi potvrđeno saznanje, pokazuje da se eventualni gubitak stratifikacije, što je veoma čest slučaj u početnoj fazi požara, može promatrati kao reverzibilan proces!

- (!) Navedena sposobnost “re-stratifikacije” dima, nakon naknadne intervencije sustava ventilacije sa ciljem smanjenja uzdužne brzine zraka, opravdava aktivno djelovanje sustava ventilacije u početnoj fazi požara, bez obzira što prvobitna slika strujanja i raspodjele dima može ukazivati na nepovoljne uvjete za bilo kakav oblik evakuacije. Ovo predstavlja jednu od ključnih postavki za provođenje predmetne operativne strategije rada ventilacijskog sustava u uvjetima požara!

- **Požarni test u tunelu Mala Kapela ($L = 5.760$ m), desna cijev: $Q = 3,5$ MW**
(10.06.2005., izvor BI)



Foto 3: Pogled na tunel prije startanja požarnog testa – pripreme, $u_z = 4,0$ m/s

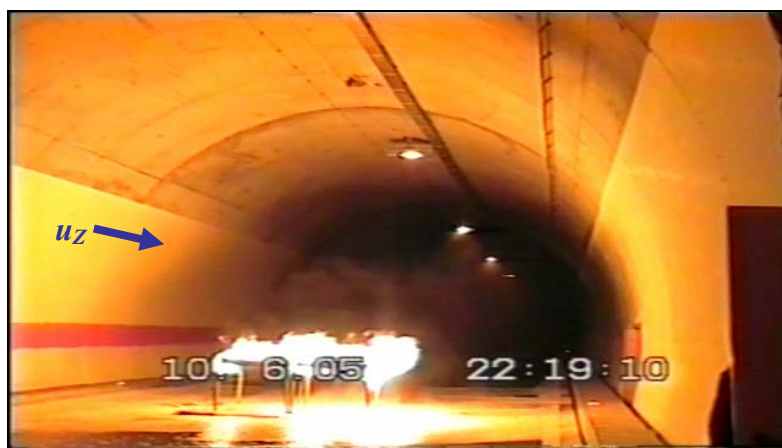


Foto 4: Startanje požarnog testa, $u_z = 3,9$ m/s → zadržavanje poprečnog presjeka



Foto 5: Ponovno uspostavljanje stratifikacije dima, $u_z \leq 1,5$ m/s → „slobodna zona“

- **Požarni test u tunelu Sveti Rok ($L = 5.670$ m), desna cijev: $Q = 3,5$ MW**
(16.12.2003., izvor BI)

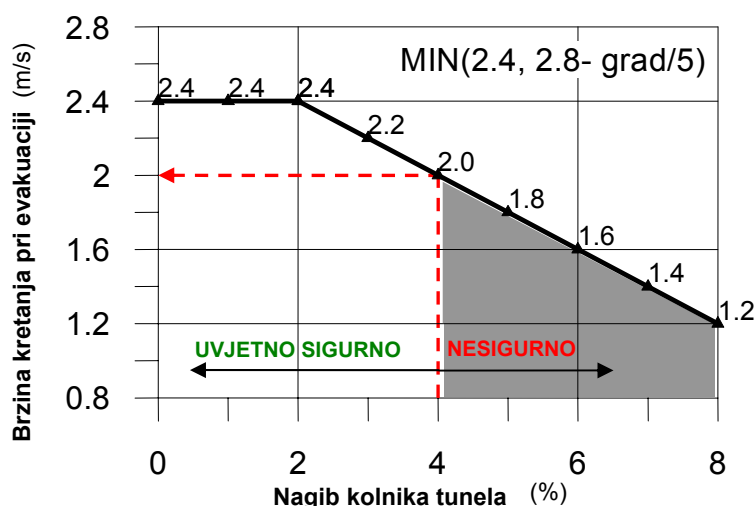


Foto 6: Generiranje dima neposredno nakon zapaljenja gorive smjese, $u_z = 0 \div 0,5$ m/s
(uočljiv je uzgon dima, bez otklona u odnosu na vertikalnu os!)



Foto 7: Razvoj stratifikacije dima u početnoj fazi požarnog testa, $u_z = 0,7$ m/s

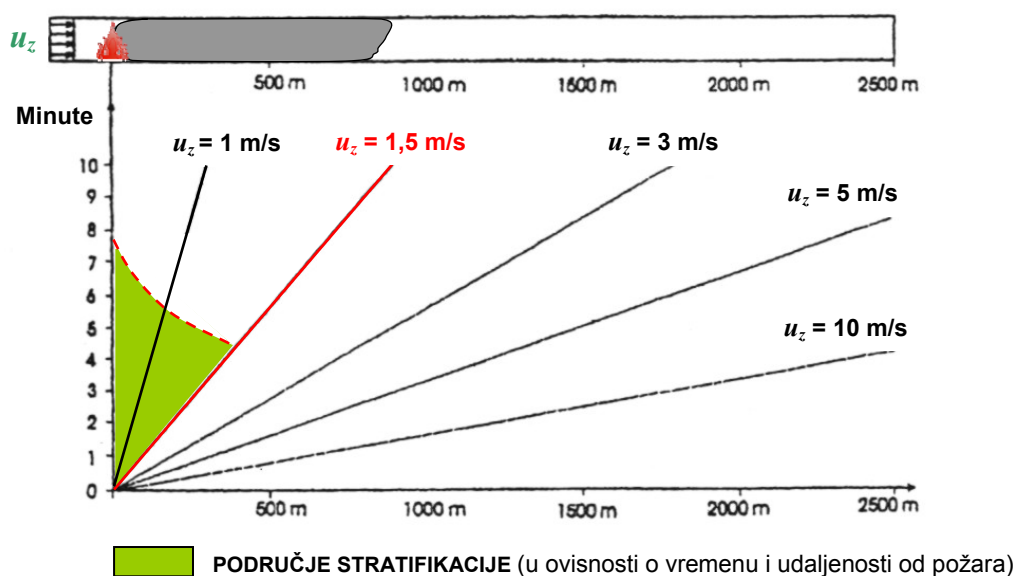
- b) Brzina širenja dima u uvjetima stratifikacije (zeleno označeno područje na Slici 13., $u_z \leq 1,5$ m/s) je mala, što ostavlja putnicima više vremena za evakuaciju. Obzirom da su brzine širenja dimnog sloja, u slučaju kada se on ohlađuje i postupno spušta ka kolniku, u pravilu niže od 2 m/s, ne postoji opasnost da fronta dima sustigne putnike koji se evakuiraju, pod pretpostavkom da su pokretljivi²⁴ i da su se u početnoj fazi evakuacije nalazili izvan zadimljene zone. Ova konstatacija vrijedi za tunele s nagibom manjim od 4%, dok kod tunela s nagibom većim ili jednakim 4% postoji realna opasnost da neki putnici budu sustignuti dimom (Slika 12.)! Na sreću, najveći broj tunela izvodi se s nagibom kolnika do 3%, dok najveći broj tunela s nagibom preko 3% otpada na urbane tunele, gdje su uvjeti evakuacije znatno povoljniji (za ilustraciju vidi Sliku 14.).



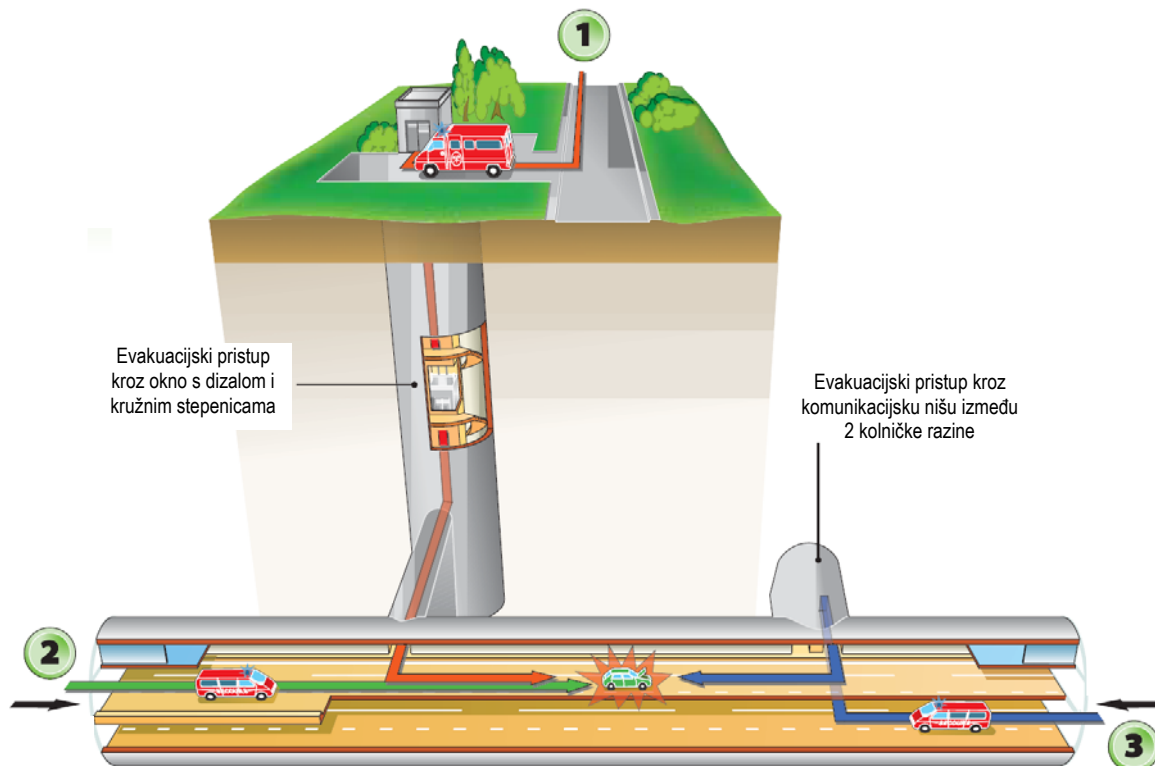
Slika 12.* Brzina kretanja putnika pri evakuaciji u ovisnosti o nagibu kolnika tunela [50]
(*dopuna autora)

Potrebno je napomenuti da ova „matematička“ analiza evakuacije u uvjetima stratificiranog strujanja treba biti uzeta s velikom dozom opreznosti, jer je postupak evakuacije putnika daleko složeniji po svojoj strukturi i broju utjecajnih faktora od gore izloženog modela. Uostalom, on se temelji na statističkim podacima, koji na žalost ne uzimaju u obzir realne mogućnosti evakuacije i ograničenja svakog pojedinca. O detaljima evakuacije, vezano za faze razvoja požara biti će govora u daljnjem tekstu (Poglavlje 4.3).

²⁴ Podrazumijeva se da kod osoba sa smanjenom sposobnošću kretanja gore navedene vrijednosti brzina kretanja prilikom evakuacije ne vrijede! Prema inozemnim izvorima broj tako hendikepiranih osoba u populaciji iznosi 3-5% [56].



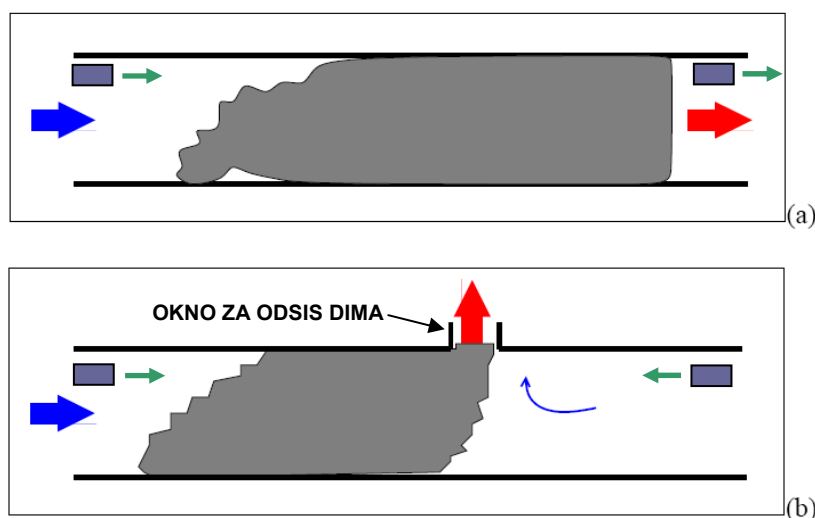
Slika 13.* Područje razdiobe dima u ovisnosti o uzdužnoj brzini zraka [57]
(*dopuna autora)



Slika 14. Evakuacija putnika pomoću okana u gradskom tunelu (istočni prilaz Parizu, A86) [58]
(Ilustracija povoljnih uvjeta evakuacije s 3 moguća smjera pristupa spasilačkih ekipa!)

4.2.4. Odimljavanje i kritična brzina strujanja zraka

Odimljavanje predstavlja proces potiskivanja, guranja smjese dima/zraka prema jednom od portala tunela, što je karakteristika širenja dima u tunelima sa standardnom izvedbom uzdužne ventilacije (Slika 15.a). Kod sustava parcijalne uzdužne ventilacije s tzv. “masivnim” odsisima, koji se izvode pomoću građevinskih okana, dim se potiskuje prema spomenutim točkama odsisa (Slika 15.b).



Slika 15. Odimljavanje kod različitih izvedbi sustava uzdužne ventilacije tunela [58]

U najopćenitijem slučaju, odimljavanje može biti izazvano vanjskim meteorološkim faktorima (vjetar, razlika barometarskih tlakova na portalima i dr.) i/ili termodinamičkim efektima požara (“efekt dimnjaka”). U tom slučaju, smjer odimljavanja ovisi isključivo o navedenim pojavama, te nije u domeni odlučivanja operatera. Međutim pojam “odimljavanja” prvenstveno se veže uz aktivno djelovanje sustava ventilacije koji, u određenoj fazi požarnog incidenta, svojom porivnom silom djeluje na širenje dima u željenom smjeru i s traženom brzinom, te tada govorimo o postupku “kontroliranog odimljavanja”. U daljnjem tekstu najviše pažnje posvetit će se upravo uvjetima koje sustav ventilacije treba ostvariti da bismo postigli efekte kontroliranog odimljavanja, jer imaju odlučujuću ulogu na sigurnost vatrogasaca tijekom intervencije. Naime, vatrogascima koji imaju zadatak pristupiti požarištu i započeti neposredno gašenje požara, potrebno je osigurati slobodan pristup požarištu, oslobođen od dima, a tijekom gašenja požara spriječiti bilo kakav vanjski utjecaj na promjenu smjera odimljavanja, tj. na povratno strujanje dima, čime bi vatrogasci bili ulovljeni u “dimnu klopku”.

4.2.4.1. Utjecaj uzdužne brzine zraka na širenje dima u fazi odimljavanja

Najznačajniji utjecaj na smjer, intenzitet i distribuciju dima unutar tunelske cijevi tijekom procesa odimljavanja ima uzdužna brzina zraka, mjerena "uzstrujno"²⁵ od mjesta požara (u_{z0}). Iako za predstojeću analizu distribucije dima nije relevantno koji su gradijenti tlaka, odnosno porivne sile utjecale na postizanje navedene brzine, u pravilu se smatra da je ona rezultat djelovanja ventilacijskog sustava, odnosno da je njegov utjecaj najznačajniji.

Kao što je već rečeno, primarna funkcija ventilacijskog sustava u uvjetima kontroliranog odimljavanja je da onemogući povratno strujanje dima. Naime, u slučaju manjih vrijednosti uzdužne brzine strujanja zraka, javlja se djelovanjem termičkog uzgona slojevito širenje dima uz strop tunela uzvodno od mjesta požara (tzv. engl. "*backlayering*"), tj. suprotno od dominantnog smjera strujanja koji je uspostavljen djelovanjem sustava ventilacije. Pri tome je dužina zone povratnog strujanja²⁶ definirana kao udaljenost od mjesta požara na kojoj je uzstrujna brzina dimnog sloja neutralizirana djelovanjem sustava ventilacije i svedena na nultu vrijednost.

Prilikom analize uvjeta pod kojima se obavlja spomenuti proces odimljavanja potrebno je uvesti veoma važan pojam tzv. "*kritične brzine*" (u_c):

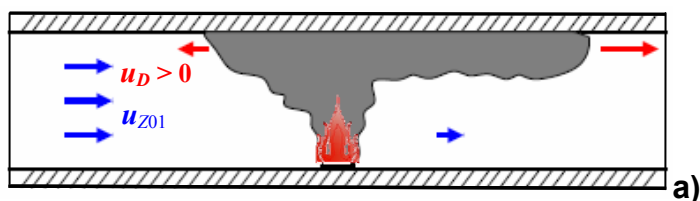
- (!) **Kritična brzina definira se kao "minimalna uzdužna brzina strujanja zraka, usrednjena po poprečnom presjeku tunela, kod koje je onemogućeno povratno strujanje dima, tj. kod koje je dužina zone povratnog strujanja dima jednaka nuli."**

Postizanje kritične brzine zraka ključni je preduvjet za uspješnu intervenciju vatrogasnih postrojbi i njihov siguran rad na gašenju požara. Neodgovarajuće dimenzioniran ili nestabilan sustav ventilacije, koji nije u mogućnosti osigurati postizanje kritične brzine u uvjetima požara, izravno ugrožava život vatrogasaca koji su ušli u tunelsku cijev i pristupili gašenju požara.

Ovisno o odnosu postignute uzdužne brzine strujanja zraka uzstrujno od mjesta požara (u_{z0}) i izračunate kritične brzine za određeni tunel i požarno opterećenje, razlikujemo slijedeće karakteristične slučajeve širenja dima (uz nagib tunela 0%):

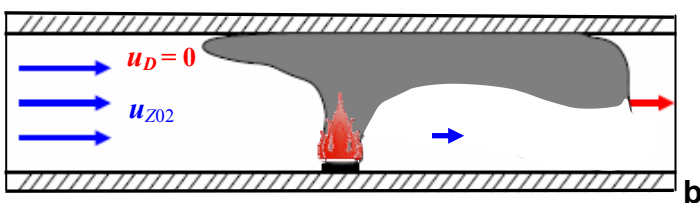
²⁵ Pojam "uzstrujno" i "nizstrujno" odnosi se na uspostavljeni smjer strujanja zraka djelovanjem ventilacijskog sustava tunela.

²⁶ engl. "*backlayering distance*"



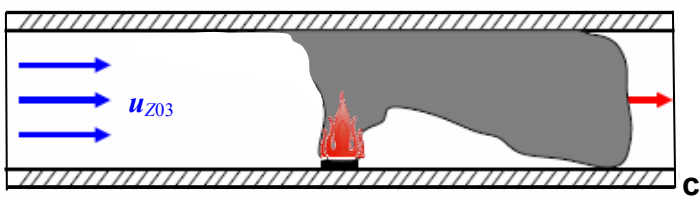
Slučaj a): $u_{z01} \ll u_c$

Uzdužna brzina zraka bitno je manja od kritične brzine, stratificirani sloj dima se uzstrujno širi. Nizstrujno se održava stratifikacija dima.



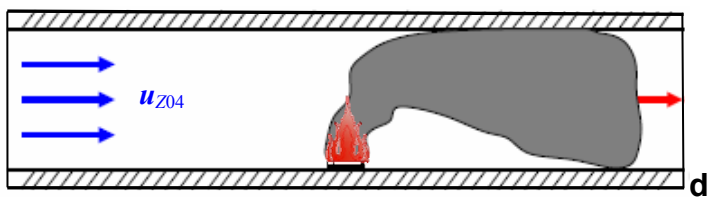
Slučaj b): $u_{z02} < u_c$

Uzdužna brzina zraka je manja od kritične brzine, stratificirani sloj dima uzstrujno od požara je stacionaran. Nizstrujno se održava stratifikacija dima.



Slučaj c): $u_{z03} = u_c$

Uzdužna brzina zraka je jednaka kritičnoj brzini, uzstrujno ne postoji izraženi stratificirani sloj dima. Čelo dima se formira neposredno prije mjesta požara. Nizstrujno se dim širi turbulentno.



Slučaj d): $u_{z04} > u_c$

Uzdužna brzina zraka je veća od kritične brzine, uzstrujno ne postoji stratificirani sloj dima. Čelo dima ne postoji. Nizstrujno se dim širi turbulentno.

Slika 16. Karakteristični slučajevi odimljavanja



Foto 8: Prikaz procesa odimljavanja

$$u_z = 3,3 \text{ m/s} > u_c \approx 1,2 \div 1,4 \text{ m/s}$$

(Izvor: Tunel Sveti Rok, požarni test, 02.02.2004., BI)

Obrazloženje uz Foto 8:

Na fotografiji br. 8 prikazan je proces tzv. „kontroliranog odimljavanja“ s uzdužnom brzinom zraka koja je znatno veća od kritične brzine (odgovara slučaju **d**, Slika 16.). Radi se o požarnom testu, izvedenom prema austrijskim smjernicama RVS 9.261, s tavama goriva (mješavina benzina, diesel goriva i vode). Požar je nominalnog toplinskog učinka od $Q=3,5 \text{ MW}$, a predviđena kritična brzina za dane uvjete iznosi:

$$u_c = 1,2 \div 1,4 \text{ m/s}$$

Vidljivo je izraženo turbulentno strujanje nizstrujno od mjesta požara i potpuno nezadimljena zona ispred mjesta požara, slobodna za sigurnu intervenciju vatrogasaca.

Potrebno je napomenuti da svaki pokušaj klasificiranja i svođenja na karakteristične slučajeve ovako složenih aerodinamičkih pojava, uvjetovanih termičkim efektima požara, nužno dovodi do simplifikacije i mogućih grešaka u analizi samog procesa. Stoga treba biti veoma oprezan u donošenju zaključaka i u njihovoj interpretaciji, pogotovo ako ih primjenjujemo na šire područje djelovanja dima. Naime, uvjeti strujanja i širenja dima uzstrujno i nizstrujno od mjesta požara su vrlo složeni i raznoliki, te mogu rezultirati pojavnim oblicima koji nisu eksplicitno navedeni u gore opisanim karakterističnim slučajevima. Npr. nizstrujno strujanje u slučaju c) može se odvijati i na način da dim ostane u stratificiranoj formi, što je posebno izraženo u neposrednoj zoni požara. No, to je obično tranzijentna pojava širenja dima karakteristična za prijelaz iz stanja b) $\rightarrow$ c), teško održiva u duljem vremenskom razdoblju.

Uvjeti strujanja nizstrujno od mjesta požara, pod kojima dolazi do narušavanja stratificiranog sloja dima, tj. određivanje brzine pri kojoj se javlja "destratifikacija", nisu u cijelosti poznati. Precizna definicija i određivanje te brzine, uz sadašnja saznanja, je delikatno, jer dim može biti stratificiran u neposrednoj blizini središta požara, te se destratificirati nešto dalje, a početna stratifikacija bitno ovisi i o prisutnosti prepreka u tunelu (tzv. „*blockage*“ efekt zaustavljenih vozila).

4.2.4.2. Određivanje kritične brzine strujanja zraka

Izrazi za proračun kritične brzine zraka razvijali su se od najjednostavnijeg oblika:

$$u_C = f\left(\sqrt[3]{\frac{Q}{B_t}}\right) \quad (4)$$

gdje je Q toplinska snaga požara, a B_t širina tunelske cijevi, preko *Thomasovog* empirijskog izraza :

$$u_C = \left[\frac{gQH}{\rho_0 T_0 c_p A} \right]^{1/3} \quad (5)$$

u kojem je g gravitacijska akceleracija, Q oslobođena konvektivna toplina, H visina tunelske cijevi, ρ_0 gustoća zraka, T_0 temperatura dolazećeg zraka, c_p specifična toplina zraka i A površina poprečnog presjeka tunelske cijevi.

Thomasov izraz modificirali su *Danziger* i *Kennedy* [59], a konačni oblik namijenjen za praktičnu upotrebu, koji je potvrđen ispitivanjima u naravi [60], glasi:

$$u_c = K_1 K_2 \left(\frac{gQH}{\rho_0 T_D c_p A} \right)^{1/3} \quad (6)$$

gdje je :

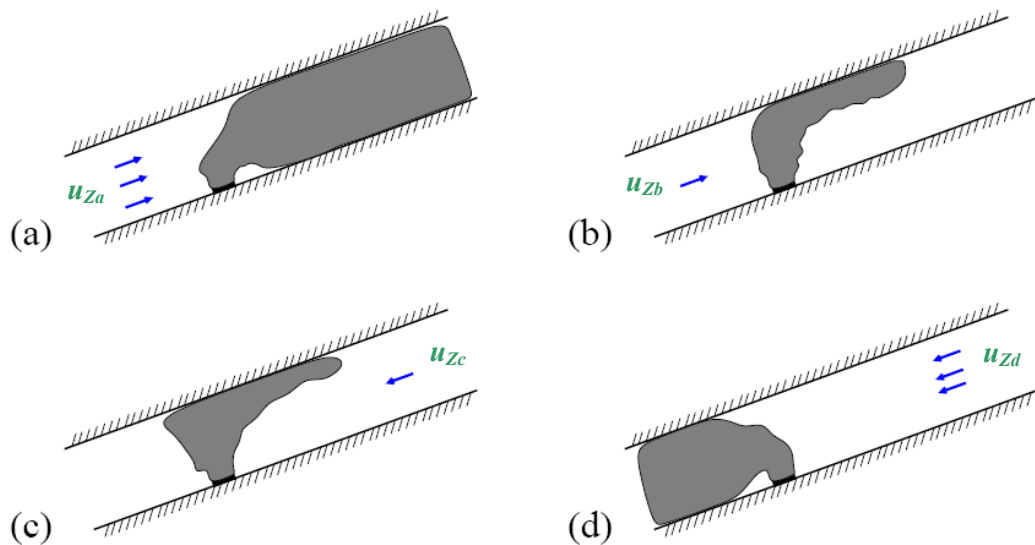
- koeficijent $K_1 = Fr_c^{-1/3}$ (6.1)

- koeficijent $K_2 = 1 + 0,037(nagib)^{0,8}$ (6.2)

- prosječna temperatura dima $T_D = \frac{Q}{\rho_0 \cdot c_p \cdot A \cdot u_c} + T_0$ (6.3)

Navedena formula za proračun kritične brzine zraka (u_c) zahtjeva iterativni postupak obzirom da je vrijednost kritične brzine sadržana i u izrazu za prosječnu temperaturu dima (6.3).

Kao što je vidljivo iz izraza (6.2) na vrijednost kritične brzine, pored ostalih parametara, značajno utječe i nagib tunela, zbog uzgonskog efekta kojem su podvrgnuti vrući plinovi (dim). Ostali parametri, koji su pod $\sqrt[3]{}$, manje su utjecajni.



Slika 17. Karakteristični slučajevi odimljavanja u tunelu s nagibom [48]

$$(u_{Zd} > u_{Zc}; u_{Za} > u_{Zb}; Q = \text{const.})$$

Uvođenje *Froudeovog* broja kroz koeficijent K_1 u izrazu (6.1) dodatno povećava složenost proračuna, obzirom da nisu poznati svi elementi za njegovo određivanje. Na temelju već spomenutih modelskih ispitivanja ventilacije tunela *Sveti Rok* [17], provedenih u *Brodarskom institutu* u izotermnim uvjetima, ustanovljeno je da se rezultati ispitivanja na modelu vrlo dobro slažu s teoretskom krivuljom dobivenom za vrijednost *Froudeovog* broja 4,5 i to pogotovo u području viših požarnih opterećenja [18]. Utvrđena odstupanja izmjerenih kritičnih brzina u BI-u, u području nižih požarnih opterećenja (5 i 10 MW), objašnjavaju se činjenicom da je gustoća "hladnog" dima²⁷ održavana konstantnom za cjelokupni interval ispitivanja od 5 do 20 MW, što nije fizikalna realnost. Navedena gustoća odgovarala je temperaturi dima od 1350°C ($\approx 0,182 \text{ kg/m}^3$), što je previsoka vrijednost za požare ovako niskog toplinskog učinka.

Uvažavajući gore navedeno obrazloženje, za očekivati je da najveću sličnost s procesom odimljavanja u naravi ima požarni test na modelskom ispitivanju kojim se simulirao požar od 20 MW (označeno žutom bojom u Tablici 3.).

Tablica 3. Ulazni podaci i rezultati određivanja kritične brzine na modelu i u naravi za slučaj tunela Sv. Rok (preuzeto iz [18])

U NARAVI	Toplinsko opterećenje	MW	5	10	20
	Ekvivalentna goriva površina	m^2	2	4	8
	Generirani volumen dima	m^3/s	20	33	60
NA MODELU (*)	Ekvivalentna goriva površina	cm^2	32	64	128
	Generirani volumen "hladnog dima"	l/s	6,4	10,6	19,2
	Protok zraka kroz tunel	m^3/s	0,0393	0,0458	0,0467
	Brzina strujanja zraka kroz tunelsku cijev modela	m/s	0,423	0,493	0,503
	Udaljenost čela dimnog sloja od mjesta požara	m	-2,0 do -1,8	-2,0 do -1,8	-2,0 do -1,8
REZULTAT	Udaljenost ²⁸ čela dimnog sloja od mjesta požara (u naravi)	m	- 50 do - 45	- 50 do - 45	- 50 do - 45
	Kritična brzina strujanja zraka kroz tunel (u naravi)	m/s	2,115	2,465	2,515

(*) Geometrijska sličnost modela $C_L = 25$ (mjerilo 1 : 25)

²⁷ radi se o mješavini helija, CO_2 i parafinskih para.

²⁸ Negativni predznak označava da je udaljenost mjerena u smjeru suprotnom od dominantnog smjera strujanja zraka tijekom režima "odimljavanja".

Određivanjem kritične brzine strujanja za različite toplinske snage požara (simuliranog ložištem na propan) u uvjetima neizotermnih modelskih ispitivanja na malim modelima bavili su se Oka i Atkinson [61]. Pri tome su predložili novi izraz za kritičnu brzinu, koristeći se bezdimenzijskim veličinama toplinske snage i kritične brzine.

Bez obzira na primijenjeni izraz za proračun kritične brzine i broj parametara koji se pojavljuju u izrazima za proračun, vidljivo je da je kritična brzina prikazana monotono rastućom krivuljom, kojoj nagib opada s porastom toplinske snage požara. Drugim riječima, kritične brzine se sporo mijenjaju u području visokih požarnih opterećenja, što omogućuje da se u praksi s uzdužnom brzinom zraka od oko 3 m/s uspješno izvrši odimljavanje tunela za široki raspon požarnih opterećenja. Međutim, neki autori navode [62] da izračun kritične brzine, temeljen na tradicionalnom *Froudeovom* kriteriju sličnosti ima ozbiljne mane, obzirom da se vrijednost izračunatih kritičnih brzina za raspon požara od 50÷100 MW povećava za 5 do 15%. Nadalje, *Froudeovim* kriterijem sličnosti ne može se objasniti eventualno postojanje „super kritične“ brzine, koja bi se mogla pojaviti kod velikih požarnih opterećenja i koja se ne uklapa u standardni izraz za kritičnu brzinu.

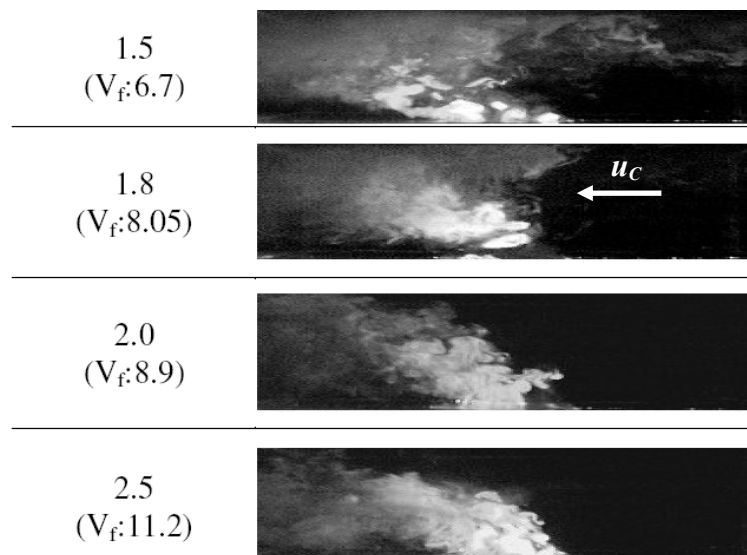


Foto 9: Distribucija dima u slučaju asimetričnog profila uzdužne brzine ($u_c = V_f$), [14]

Međutim, potrebno je napomenuti da sva dosadašnja razmatranja o kritičnoj brzini podrazumijevaju da se radi o ujednačenom profilu brzine. U slučaju asimetričnog profila brzine, najčešće izazvanog radom bliskog aksijalnog ventilatora, vrijednost kritične brzine zraka je znatno veća od uobičajene (Foto 9).

4.2.5. Povratno slojevito širenje dima

Fenomen povratnog slojevitog širenja dima (tzv. „*backlayering*“) već je u nekoliko navrata spomenut u prethodnom tekstu. Tako se, pri postupku odimljavanja, naziva slojevito širenje dijela dimne mase uz strop tunela u smjeru suprotnom smjeru odimljavanja, usprkos postignutom dominantnom strujanju zraka u željenom smjeru, ali ipak ne dovoljno snažnom. Ovaj proces rezultat je činjenice da je slojevito širenje dima snažno uvjetovano gravitacijskim silama (uzgonom), te da dim u gornjem dijelu tunela uspijeva „probiti“ frontu odimljavanja u slučaju kada su brzine odimljavanja manje od kritične vrijednosti za promatrani slučaj. Fenomen povratnog strujanja dima veoma je teško proučavati u realnim uvjetima, jer nije moguće u potpunosti osigurati potrebne vrijednosti ni aerodinamičkih ni termodinamičkih parametara. Iz prethodno spomenutih razloga, ova ispitivanja su prije masovnije upotrebe CFD alata u požarnom inženjerstvu, obavljana u kontroliranim laboratorijskim ispitivanjima na geometrijski umanjenim modelima. Takva modelska ispitivanja odimljavanja i povratnog strujanja dima u neizotermnim uvjetima malih toplinskih snaga (do 28 kW) obavili su Wu i Bakar [62].



Foto 10: Prikaz širenja dima ostvaren prilikom neizotermnih modelskih ispitivanja [62]
($u_z < u_c$, toplinska snaga izvora $Q = 15 \text{ kW}$)

Ustanovili su da, ukoliko intermitentni²⁹ dio plamena ne doseže svod tunela, tada na sliku strujanja dominantan utjecaj ima aerostatski uzgon, koji ovisi o količini oslobođene topline požara (HRR), tj. o toplinskoj snazi. U tom slučaju, koji je karakterističan za manje požare, kritična brzina također je ovisna o toplinskoj snazi požara ($u_c \propto \sqrt[3]{Q}$), a u povratnoj struji sudjeluje samo dim.

²⁹ Dolazi od *McCaffrey*ve podjele slobodnog plamena na 3 zone: zona perzistentnog plamena, zona intermitentnog (povremenog) plamena i zona tzv. „lebdjećeg“ plamena.

Za slučaj kada zbog povećanja toplinske snage požara intermitentni dio plamena doseže svod tunela, slika strujanja prestaje ovisiti o toplinskoj snazi požara. Tada se u povratnoj struji nalazi i dio intermitentnog plamena, a kritična brzina postaje gotovo neovisna o promjeni toplinske snage požara ($u_c \neq f(Q)$). U ovim uvjetima požar s pripadajućim plamenom predstavlja branu nadolazećoj zračnoj struji, koja se očituje u pojavi naglog ubrzanja zračne struje prilikom nailaska na mjesto požara.

Istraživanje povratnog strujanja dima obavljena je i u sklopu već spomenutih modelskih ispitivanja ventilacije tunela *Sveti Rok* u strogo kontroliranim izotermnim uvjetima, koji su omogućili vrlo vjernu vizualizaciju procesa povratnog strujanja (Foto 11).

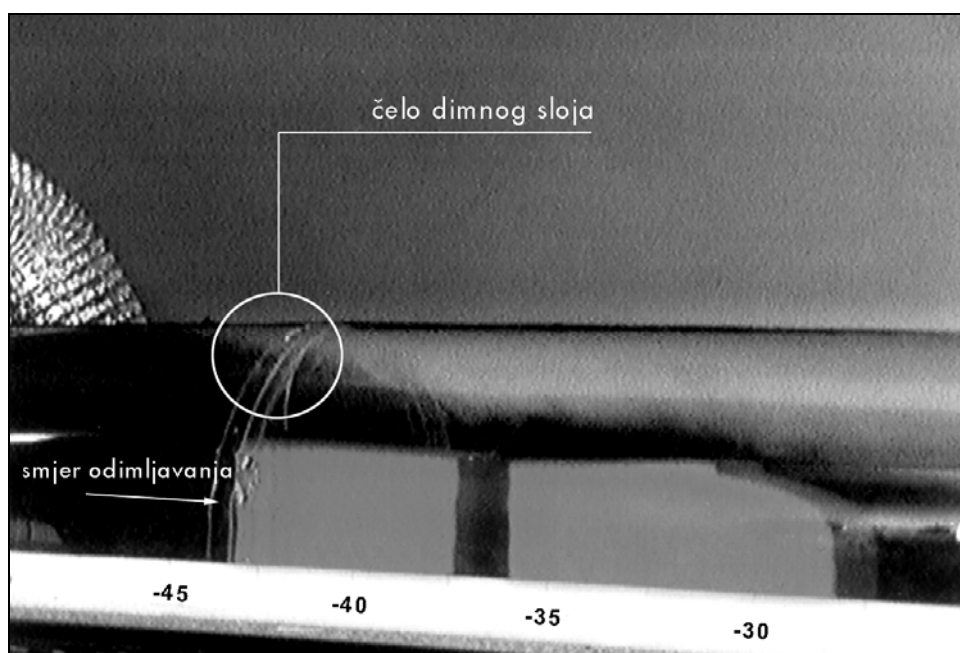
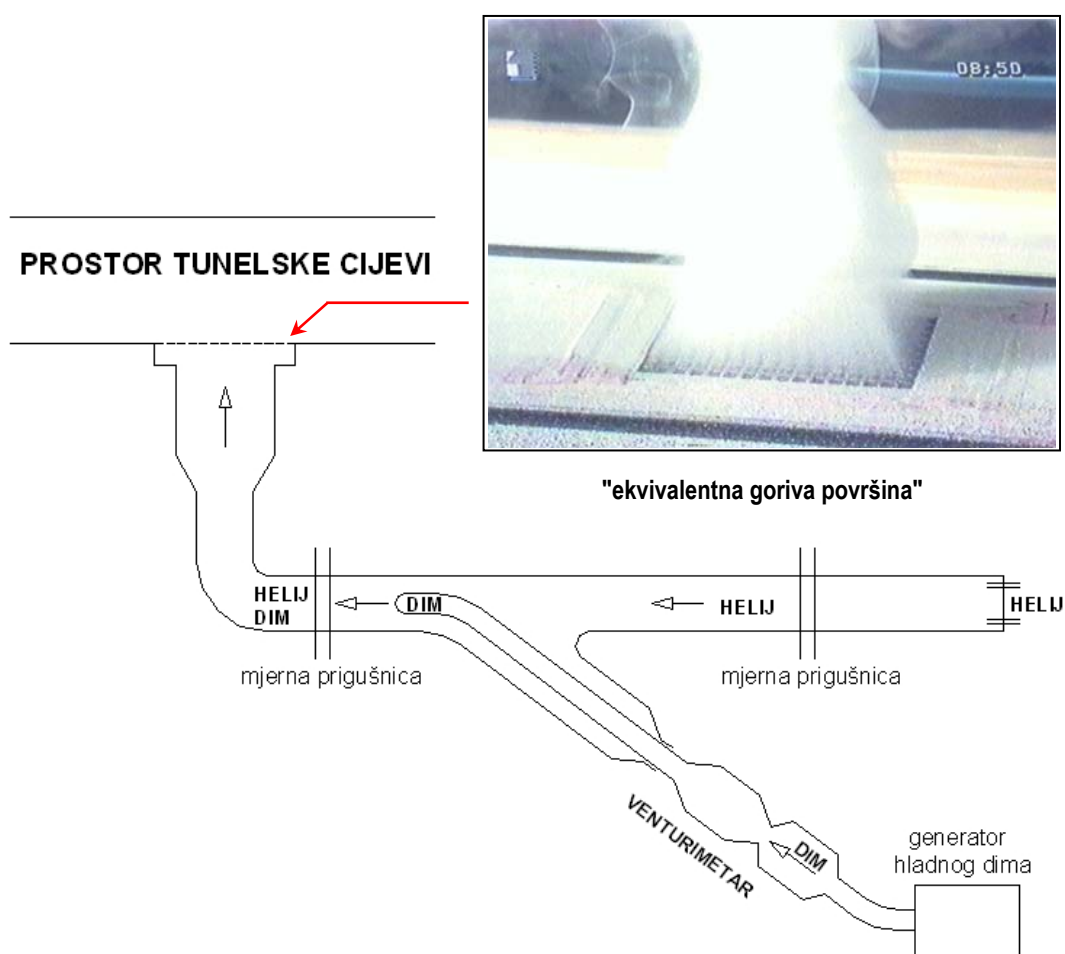


Foto 11: Prikaz povratnog slojevitog širenja dima prilikom izotermnih modelskih ispitivanja
(Izvor: modelska ispitivanja ventilacije tunela *Sveti Rok*, 1998.; BI)

Prilikom navedenih ispitivanja razlika u gustoći "hladnog" dima i okolnog zraka postignuta je korištenjem mješavine helija, CO_2 i parafinskih para (zbog vizualizacije) u kontroliranom omjeru (Slika 18.). Omjer miješanja spomenutih plinskih komponenti određen je na način da gustoća plinske smjese odgovara gustoći realnog dima pri temperaturama koje su karakteristične za promatrano požarno opterećenje, tj. toplinsku snagu požara (vidi obrazloženje na str. 58).

Iako su temperature dima u pravilu ovisne o promatranom požarnom opterećenju, tj. razvijenoj toplinskoj snazi požara, zbog problema u postizanju i održavanju različitih omjera miješanja pri relativno malim i teško mjerljivim protočnim količinama navedenih plinskih komponenti (Tablica 3.), gustoća generiranog hladnog dima održavala se konstantnom u iznosu od $0,182 \text{ kg/m}^3$. U realnim uvjetima požara, navedena razlika gustoća i njome stvoreno uzgonsko gibanje dima, je rezultat različitih temperatura vrućeg dima i okolnog hladnijeg zraka.



Slika 18. Sustav za generiranje „hladnog“ dima i vizualizaciju inicijalne faze požara
(Izvor: modelska ispitivanja ventilacije tunela Sveti Rok, 1998.; BI)

Iako fizikalni mehanizam povratnog strujanja dima nije u cijelosti poznat, a još manje egzaktno matematički opisan, jedan od mogućih razloga spomenutog "probijanja" fronte odimljavanja vjerojatno se nalazi u istodobnom djelovanju dvaju poznatih efekata:

- U gornjoj zoni tunela neposredno uz svod, brzina odimljavanja pada sukladno zakonitostima strujanja u cijevi i pripadajućeg turbulentnog graničnog sloja. Drugim riječima, profil brzina ponaša se prema paraboli višeg reda, koja je u središnjem dijelu blago spljoštena, a prema stjenkama tunela brzina gotovo da pravocrtno (linearno) pada na nultu vrijednost.
- S druge strane, uz svod tunela koncentriran je cjelokupni protok dima koji se generira u slučaju požara. Prema standardiziranom vrijednostima [63] prikazanim u Tablici 4., npr. za požare od 20 MW predviđeni generirani protok dima iznosi 60 m³/s. Navedena količina dima se zbog efekta aerostatskog uzgona u cijelosti usmjerava prema svodu tunela, gdje nailazeći na fizičku prepreku (oblogu tunela) mijenja smjer i širi se na obje strane tunelske cijevi u aksijalnom smjeru.

Tablica 4. Standardizirane vrijednosti požarnih parametara prema PIARC-u

STANDARDIZIRANI PARAMETRI POŽARA			TOPLINSKA SNAGA POŽARA (MW)		
			5	20 ³⁰	100
1.	Ekvivalentna goriva površina	m ²	2	8	30÷100
2.	Generirani protok dima	m ³ /s	20	60	100÷200
3.	Izvor požara	-	osobno vozilo	autobus, kamion	cisterna
4.	Max. temperatura ³¹	°C	400	700	1000

Uvažavajući navedene činjenice, autor polazi od pretpostavke da se u vrlo tankom sloju, horizontalno položenom uz svod tunela na udaljenosti y od kolnika, mehanizam povratnog strujanje dima može uvjetno svesti na „ravnotežu dinamičkih tlakova“ koji djeluju na zamišljenoj graničnoj plohi zračnog i dimnog sloja. Naime, dinamičkom tlaku dimnog sloja u uzstrujnom gibanju, koji se koncentrirao uz svod tunela, suprotstavlja se dinamički tlak zračne mase u suprotnom smjeru, koji odgovara uspostavljenom smjeru odimljavanja.

³⁰ Recentna ispitivanja požara ukazuju da su požarna opterećenja prilikom gorenja kamiona sa zapaljivim materijalom znatno viša (kratkotrajno i iznad 100 MW).

³¹ Temperatura na udaljenosti 10 m nizstrujno od požara.

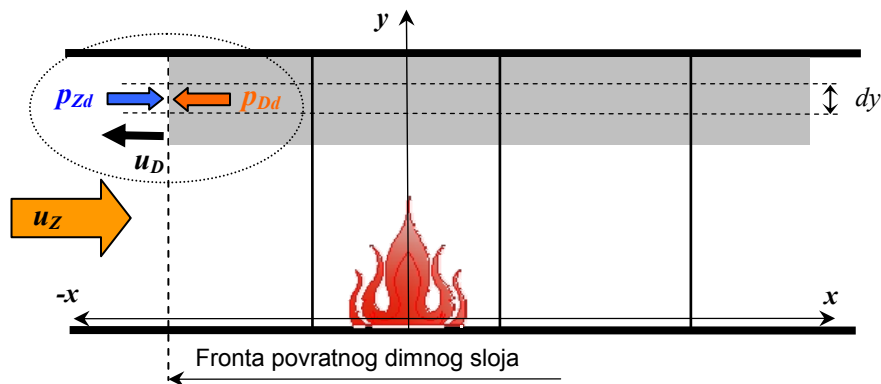
Sve dok postoji neravnoteža navedenih dinamičkih tlakova na zamišljenoj plohi, u korist dimnog sloja, uzstrujno širenje dima, tzv. „backlayering“ se nastavlja (Slika 19.):

$$p_{Dd}(y) = \frac{1}{2} \rho_D \cdot u_D(y)^2 > p_{Zd}(y) = \frac{1}{2} \rho_Z \cdot u_Z(y)^2 \quad (7.1)$$

U slučaju ravnoteže navedenih dinamičkih tlakova na zamišljenoj plohi, odnosno dominacije dinamičkog tlaka zraka, uzstrujno širenje dima, se zaustavlja, odnosno potiskuje u smjeru odimljavanja:

$$p_{Dd}(y) = \frac{1}{2} \rho_D \cdot u_D(y)^2 \leq p_{Zd}(y) = \frac{1}{2} \rho_Z \cdot u_Z(y)^2 \quad (7.2)$$

Svakako da bi detaljna analiza procesa povratnog strujanja dima, osim opisanog mehanizma dinamičke ravnoteže zahtijevala i integraciju promatranih veličina po osi y , kao i odgovarajuću termodinamičku ravnotežu između slojeva. Detaljnu analiza ove pojave, temeljenu na jednom od mogućih fizikalnih modela dao je *Kunsch* [64], međutim njena elaboracija prelazi zadane okvire ovog rada.



Slika 19. Hipotetski model povratnog strujanja dimnog sloja („backlayering“)

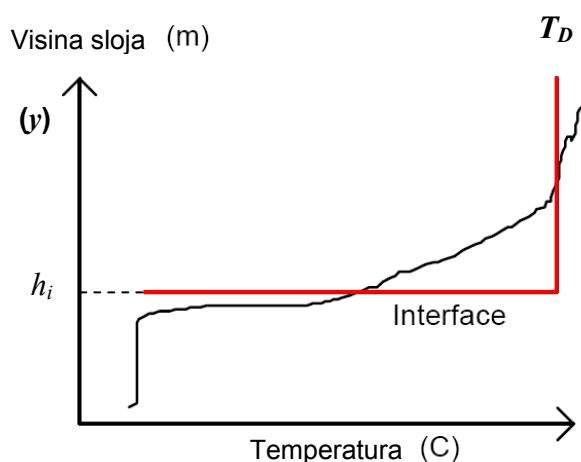
Postavljeni hipotetski model povratnog strujanja dimnog sloja temelji se na imanentnim pretpostavkama „2-zonskih“ modela transporta dima (npr. CFAST 2.0). Naime, radi se o determinističkim modelima, koji za opisivanje procesa transporta dima koriste 2 kontrolna volumena (sloja) unutar promatranog prostora. Jedan se formira neposredno uz strop prostora i sastoji se od vrućih produkata izgaranja, dok se drugi nalazi u donjem dijelu prostora i ispunjen je hladnijim, svježim zrakom. Svaki sloj je homogen, s jednakom temperaturom i gustoćom fluida koji ga ispunjava. Na granici zona, odnosno slojeva, pojavljuje se tanki međusloj fluida s vrlo velikim temperaturnim gradijentom.

Međutim, čak i ovako pojednostavljeni modeli transporta dima, prilagođeni praktičnim potrebama projektantskih proračuna i analiza, zahtijevaju brojne provjere modela putem odgovarajućih eksperimenata, najčešće usmjerenih na mjerenja visinskog profila temperature i usporedbe s rezultatima dobivenim „2-zonskim“ modelima (Slika 20.). Jedan od ključnih problema je proračunavanje srednje temperature i visine dimnog sloja.

Srednja temperatura dimnog sloja (T_D) određena je sljedećim izrazom *Peacocka* i *Babrauskasa* [65]:

$$T_D = \int_{h_i}^{h_t} \frac{T(h)}{h_t - h_i} dh \quad (8)$$

gdje je h_t visina prostora (tunela), a h_i visina međusloja (tzv. „interface“). Kao što se vidi iz izraza (8), upravo je točna identifikacija spomenutog međusloja, odnosno njegove visine neophodna za određivanje srednje (prosječne) temperature dimnog sloja. Za potrebe provjere modela visina međusloja se određuje eksperimentalno različitim metodama opservacije (fotometrijskom, optičkom i sl.), koje na temelju polu-empirijskih izraza omogućuju određivanje visine međusloja. Međutim, potrebno je napomenuti da većina ovih modela nije sasvim primjenjiva za slučaj analize transporta dima u tunelima, obzirom da su opisani modeli uglavnom prilagođeni uvjetima razvoja i širenja dima u prostorima manjeg volumena, bez dominantne uzdužne dimenzije, svojstvene tunelu.



Slika 20. Primjer eksperimentalno određenog visinskog profila temperature (rezultati „2-zonskog“ modela transporta dima)

4.2.6. Zaključak

Kao zaključak poglavlja o analizi aerodinamičkih pojava vezanih za transport, odnosno propagaciju dima u tunelu, može se ustvrditi da se radi o vrlo složenim procesima mehanike fluida koji se odvijaju pod kombiniranim, simultanim utjecajem termodinamičkih i aerodinamičkih parametara. U pravilu su promatrani aerodinamički fenomeni prostorno distribuirani i vremenski ovisni, tj. matematički se opisuju parcijalnim diferencijalnim jednadžbama za funkcije kojima su argumenti x, y, z, t .

Pokušaj da se determinira dinamika ovih procesa različitim numeričkim modelima nužno dovodi do simplifikacije procesa i mogućeg rizika da se neki od parametara, utjecajnih na tijek pojave u nekoj od njenih faza razvoja, neopravdano zanemari ili pretpostavi na neodgovarajući način. Problemi neizvjesnosti u rezultatima različitih modela transporta dima i mogućnost statističke evaluacije takvih rezultata, predstavljaju područje posebnog znanstvenog interesa, usko povezano sa specifičnostima provedbe različitih analiza rizika. U tom području brojne recentne radove su objavili znanstvenici sa *Instituta za tehnologiju*, Univerziteta u Lundu, Švedska [65; 66].

Uvažavajući gore navedeno, svrha analize aerodinamičkih pojava vezanih za propagaciju dima u tunelu, obavljene u ovom radu, nije detaljnije matematičko definiranje predmetnih pojava, niti unaprjeđenje pojedinih numeričkih modela transporta dima. Temeljna svrha je „prepoznavanje“ određenih zakonitosti promatranih procesa na kvalitativnoj, opisnoj razini, kao i njihove uzročno-posljedične veze, te manifestacije njihovog djelovanja na dva temeljna parametra aerodinamike tunela u uvjetima požara, a to su smjer i brzina³² širenja dima. U vezi s kvantitativnim značajkama procesa, od interesa su samo one vrijednosti koje predstavljaju granične vrijednosti za odvijanje promatranog procesa, odnosno točke infleksije, gdje proces mijenja svoj predznak (smjer).

- (!) Opisana saznanja aerodinamičkih pojava vezanih za propagaciju dima u tunelu su neophodna za oblikovanje operativne strategije upravljanja uzdužnom ventilacijom u uvjetima požara, koja treba biti opće primjenljiva, neovisno od geometrijskih značajki tunela i tehničkih karakteristika konkretnog ventilacijskog sustava.

³² Ukoliko brzinu promatramo kao vektorsku veličinu, što ona i jest, možemo govoriti o brzini ($\vec{v}$), kao o jednom parametru!

4.3. Vremenska rasčlana požarnog incidenta

Požarni incident i scenarij njegova razvoja u tunelu teško je razlučiti u vremenski strogo odvojene cjeline, zbog izrazite stohastike požarnog procesa. Međutim, reagiranje svih sudionika u prometu (putnika, vatrogasaca i ostalih interventnih službi) u slučaju požara, ima određene zakonitosti i vremenski slijed koji omogućuje da se sa stajališta aktivnosti i intervencije u tunelu požarni incident podijeli u niz vremenski i kauzalno povezanih faza, od kojih svaku pojedinačno karakteriziraju određene aktivnosti. Ova vremenska rasčlana požarnog incidenta u prepoznatljive faze omogućuje da se rad vitalnih sustava koji sudjeluju u zaštiti od požara, a pogotovo sustava ventilacije, prilagodi specifičnim potrebama svake faze.

4.3.1. Faze požarnog incidenta

Općenito se požarni incident može podijeliti u slijedeće četiri faze, prema usvojenoj podjeli od strane PIARC-a:

1. Faza: Zapaljenje

„Zapaljenje“ je faza koja počinje pojavom požara ❶, tj. zapaljenjem određene gorive tvari, nastavlja se inicijalnim razvojem požara, zatim njegovom detekcijom ❷, te završava požarnim alarmom ❸. Ukoliko je navedena detekcija požara izvršena putem automatske vatrodjave (senzorskog kabela i/ili točkastih javljača) ili ručnih javljača požara, detekcija će istovremeno izazvati aktiviranje gore spomenutog alarma, bez vremenske odgode ($\tau_i = 0$). Razlog tome je što se signal alarma dobiven s navedenih sustava smatra visoko pouzdanom naznakom pojave požara u tunelu. Međutim, ukoliko je detekcija požara obavljena posredstvom nekih drugih sustava (npr. video-nadzorom, sensorima vidljivosti, aktiviranjem mikro-kontakata u ležištima PP-aparata i dr.) ili na temelju nekih drugih indirektnih informacija kojima raspolaže operater, tada će od trenutka detekcije požara do trenutka objave požarnog alarma proći određeno „vrijeme izviđanja“ ($\tau_i > 0$), koje je operateru potrebno da s visokom dozom sigurnosti utvrdi postojanje požara. Navedenu 1. fazu obično ne karakterizira evakuacija osoba zatečenih u tunelu, iako već u ovoj fazi neke osobe mogu biti svjesne postojanja požara. Statistički, neke od njih će već u ovoj fazi, korištenjem PP-aparata unutar SOS niša, pristupiti gašenju požara i pokušat onemogućiti njegov razvoj i širenje.

2. Faza: Evakuacija I („samospašavanje“)

„Samospašavanje“ je faza koja započinje masovnom evakuacijom osoba zatečenih unutar tunela prema sigurnim izlazima, nakon objavljenog alarma (zvučni signal, informacijski paneli, radio i dr.), a završava dolaskom vatrogasnih i interventnih ekipa u požarom ugroženu tunnelsku cijev. Alarm pokreće niz unaprijed utvrđenih aktivnosti (zatvaranje tunela, obavješćavanje vatrogasne službe, promjena statusa dinamičke signalizacije prometa, pokretanje posebnih požarnih programa kojima se mijenja režim rada određenih sustava i dr.). Iako, kao što je već spomenuto u prethodnoj fazi, neke osobe zbog blizine bivaju suočene s pojavom požara i ranije, te stoga započinju s evakuacijom već u fazi 1., ipak tek nakon objave alarma počinje shvaćanje realne opasnosti za većinu osoba u tunelu, što utječe na masovnost evakuacije.

Unutar ove faze, potrebno je razlikovati sljedeća tri vremenska segmenta evakuacije [50], koji se temelje na sposobnosti osoba da „procesiraju“ podatke iz okoline koja ih okružuje, te da ih pravovremeno interpretiraju, donose odluke i djeluju:

- τ_1 : Vrijeme shvaćanja opasnosti (osvješćivanje),
(*engl.* „awareness time“ ili također izraz „*detection phase*“)
- τ_2 : Vrijeme reagiranja,
(*engl.* „reaction time“ ili također izraz „*alarm phase*“)
- τ_3 : Vrijeme kretanja,
(*engl.* „movement time“ ili također izraz „*action phase*“)

Vrijeme osvješćivanja se može definirati kao vrijeme u kojemu pojedinac postaje svjestan prijetnje. U tunelu to vrijeme najčešće ovisi o vrsti i uočljivosti alarmnog sustava kojim je opremljen tunel, te o psiho fizičkim svojstvima pojedinca. Od velike je važnosti također da je osoblje tunela sigurno u svoje djelovanje u slučaju nezgode, pogotovo ako mora donositi odluke o pokretanju požarnog alarma na temelju indirektnih pokazatelja. Međutim i blizina mjestu požara znatno utječe na vrijeme osvješćivanja. Osobe u neposrednoj blizini požara, postat će svjesni opasnosti putem fizičkih znakova kao što su dim ili vatra, te će njihovo vrijeme osvješćivanja biti kraće nego kod osoba koje će o požaru saznati posredno putem alarmnog sustava ili upozorenja na radiju.

Vrijeme reagiranja je vrijeme koje se odnosi na pojedinca, od trenutka kad je shvatio da postoji potencijalna opasnost do poduzimanja akcije, obično do odluke da započne evakuaciju. Nakon vremena osvješćivanja pojedinac je svjestan prijetnje, međutim najčešće ima izbor što će učiniti. To je čimbenik koji produljuje vrijeme reakcije. Ako pojedinac ima samo jednu mogućnost, a ona podrazumijeva da ide za drugim ljudima, vrijeme reagiranja će biti relativno kratko. Iako će vrijeme reagiranja značajno varirati ovisno o pojedincu, postoje izvjesni čimbenici koji generalno utječu na vrijeme reagiranja, kao što su: ponašanje ostalih ljudi u okolini, svjesnost pojedinca o situaciji, okolina i informacije (znakovi za upozorenje, znakovi za izlaz, itd.).

Vrijeme kretanja izravno ovisi o brzini kretanja pojedinih kategorija osoba u slučaju evakuacije u tunelu. Da bi se odredilo stvarnu brzinu kretanja (hodanja), postoje izvjesni čimbenici koje treba uzeti u obzir, a to su: gustoća ljudi (broj osoba po kvadratnom metru), uvjeti vidljivosti (smanjeni vid uslijed dima), položaj svjetala za nuždu, najsporija osoba koja određuje stvarnu brzinu kretanja (hendikepirani), uvjete tla, nagib kolnika (vidi Sliku 12.) i dr. U početnom dijelu ovog segmenta evakuacije radi se o vremenu koje je potrebno pojedincu da se evakuiira iz vozila u kojem se nalazi. To vrijeme znatno ovisi o tipu vozila. Na primjer, za evakuaciju iz osobnog auta trebati će kraće vrijeme u odnosu na evakuaciju iz autobusa na kat. U ovom drugom slučaju, vrijeme se može produžiti ako ljudi spavaju. Sve navedene čimbenike je teško egzaktno predvidjeti, međutim oni se razmatraju i odabiru tijekom određivanja modela evakuacije.

3. Faza: Evakuacija II („spašavanje uz asistenciju“)

Faza spašavanja uz asistenciju započinje dolaskom vatrogasnih i interventnih ekipa u požarom ugroženu tunelsku cijev ④, a završava evakuacijom svih dostupnih osoba iz spomenutog prostora u slobodnu i sigurnu zonu. Radi se o vrlo važnom momentu za uspješnost cjelokupne evakuacije, jer dolaskom profesionalnih osoba evakuacija se nastavlja odvijati u organiziranom i efikasnijem obliku, uz pružanje neophodne pomoći povrijeđenim i nepokretnim osobama. Ujedno je moguće i realnije procijeniti razmjere požara na temelju neposrednog uvida sa terena. Pojava spasilačkih i vatrogasnih službi također je važna i za smanjivanje eventualno nastale panike među putnicima.

4. Faza: Gašenje požara

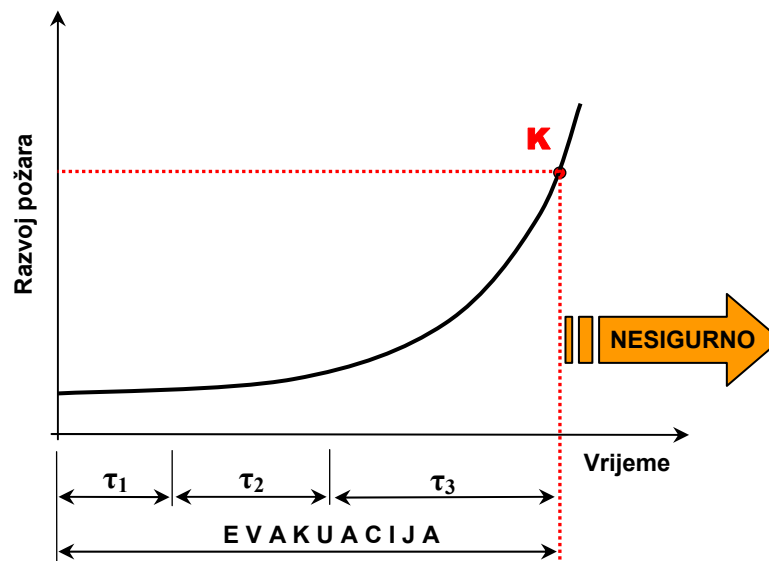
Nakon evakuacije svih putnika iz požarom neposredno ugroženog prostora, vatrogasci pristupaju gašenju požara. Vatrogasna postrojba tunela sastoji se od osoba specijalno obučениh i treniranih za rad u uvjetima požarnog incidenta, te opremljenih za intervenciju pri povišenim temperaturama (aluminizirana, zrakom hlađena odjela), smanjenoj vidljivosti (IC detektori) i zadimljenošću (aparati za disanje). Pod pretpostavkom navedene opremljenosti, te potpune fizičke spremnosti djelovanje pojedinog vatrogasaca ograničeno je na maksimalno 30 minuta³³, te razinom toplinskog zračenja od maksimalno 5 kW/m², što odgovara izlaganju temperaturi od cca. 400°C.

Karakteristično za ovu fazu požara je da zapovjednik vatrogasne postrojbe preuzima od operatera odgovornost za odluke koje se tiču osiguranja optimalnih uvjeta za gašenje požara. Ovo se prvenstveno odnosi na odabrani smjer odimljavanja i eventualnu promjenu do tada uspostavljenog dominantnog strujanja u tunelu. U pravilu se smjer odimljavanja, uspostavljen aktivnim djelovanjem ventilacijskog sustava, poklapa sa raspoloživim smjerom pristupa vatrogasne postrojbe. Ukoliko nije neophodno potrebna promjena, zadržava se smjer strujanja iz evakuacijske faze.

4.3.2. Vremenski slijed i kauzalitet faza

Potrebno je naglasiti da sve gore navedene faze požarnog incidenta (1 → 4) nemaju strogo definirane granice na vremenskoj skali, niti strogo određen interval trajanja, te da se u pravilu „preklapaju“. Međutim njihov slijed je strogo definiran, s jasnim uzročno-posljedičnim vezama. Nadalje, cilj je svake sigurnosne strategije upravljanja tunelom u akcidentnim situacijama da svojom primjenom omogući pomicanje događaja i korespondentnih faza što više ulijevo na vremenskoj skali. Na taj način se nastoji najveći dio aktivnosti, a posebno onih veoma osjetljivih, kao što su evakuacija putnika, smjestiti unutar tzv. „sigurnog vremenskog intervala“. Spomenuti interval predstavlja vrijeme od trenutka izbijanja požara do kritične točke K, koju karakterizira intenzivni razvoj požara, visoka temperatura i pojava gustog dima (smanjenje vidljivosti), odnosno stvaranje takvih uvjeta koji onemogućavaju uspješnu evakuaciju (Slika 21.).

³³ Navedeno vrijeme se bitno skraćuje ukoliko je vatrogasac izložen višestrukim djelovanjem maksimalnih toplinskih opterećenja (zračenja i konvektivnog prijenosa topline), te psihofizičkih opterećenja.



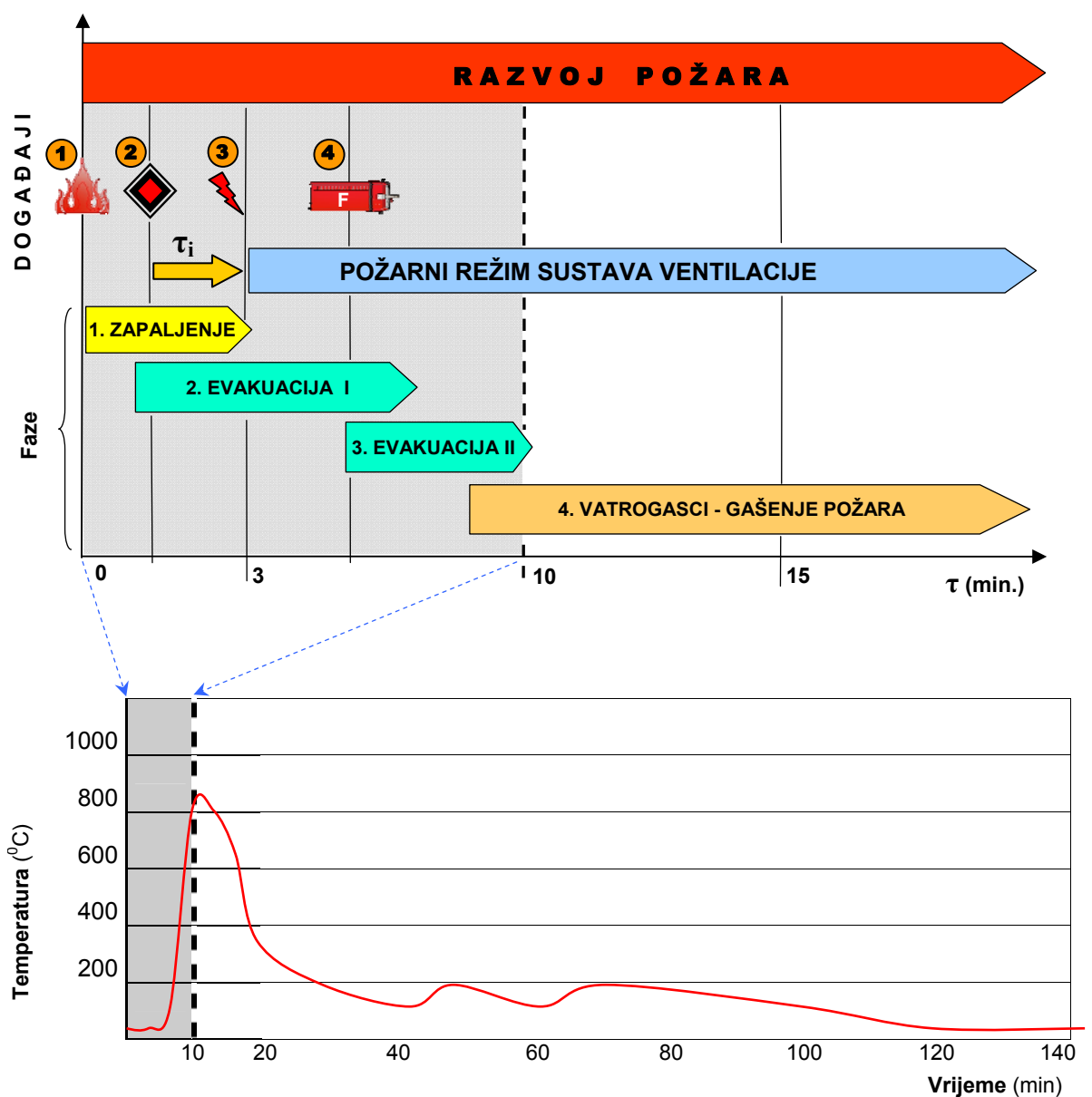
Slika 21.* Vremenski segmenti evakuacije u ovisnosti o razvoju požara [50]
(*dopuna autora)

Na Slici 21. prikazan je vremenski slijed faza, njihove međusobne veze, kao i veze s ključnim događajima u tunelu (pojava požara, detekcija, alarm, dolazak vatrogasaca i dr.). Navedena karakteristična vremena na vremenskoj osi su orijentacijska, a njihovu konkretizaciju potrebno je obaviti kroz izradu „*Plana intervencije*“, temeljenog na odabranim i razrađenim modelima evakuacije.

Na primjeru karakterističnog razvoja požara autobusa [67], interpretiranog kroz vremensku distribuciju maksimalnih temperatura (Slika 23.), te odgovarajuće preslike principijelnog prikaza rasčlane požarnog incidenta u tunelu na konkretan slučaj, vidljivo je da se niz ključnih aktivnosti treba obaviti u vrlo kratkom vremenskom razdoblju. Naime, unutar vremena od maksimalno 10 minuta („sivo“ označeno područje na Slikama 22. i 23.) potrebno je obaviti sve faze evakuacije putnika i započeti s gašenjem požara od strane vatrogasne službe. Ukoliko se to pravovremeno ne obavi, dinamika razvoja požara rezultirat će temperaturama od preko 800°C u neposrednoj blizini požara i odgovarajućom produkcijom dima, što ugrožava živote eventualno preostalih putnika u tunelskoj cijevi, a uvjete intervencije vatrogasaca čini iznimno teškim i opasnim. Potrebno je pritom napomenuti da je prag tolerancije putnika na povišenu temperaturu znatno niži od onoga koji vrijedi za opremljene i uvježbane vatrogasce.

Tako se u literaturi navodi [55] da prosječna osoba može podnijeti konstantnu temperaturu od 80°C u vremenu od maksimalno 15 minuta! Navedeno vrijeme tolerancije određeno je pojavom simptoma hipertermije. Međutim, obzirom da prilikom realnog požara imamo promjenljivu temperaturu zraka, kao prikladnija metoda za ocjenu uzima se tzv. „frakcijska doza“, kojom se ocjenjuje kumulativna količina konvektivne topline koju osoba izložena požaru akumulira tijekom vremena.

Slika 22. Opća vremenska rasčlana požarnog incidenta



Slika 23. Vremenska ovisnost maksimalnih temperatura pri požaru autobusa [67]
(izmjereno na visini $h = 2\text{ m}$ od kolnika)

4.3.3. Zahtjevi za održavanje optimalnih formi razvoja i širenja dima

Na temelju prethodne analize vremenskih faza požarnog incidenta i pripadajućih ključnih događaja, kao i opisanih fizikalnih zakonitosti temeljnih aerodinamičkih pojava, autor je mišljenja da se svakoj fazi požarnog incidenta mogu pridružiti oni oblici razvoja i širenja dima koji bi omogućili postizanje optimalnih uvjeta za provedbu aktivnosti karakterističnih za svaku pojedinu fazu (Tablica 5.). Pri tome se u ovoj fazi oblikovanja operativne strategije ne predlažu modaliteti rada sustava ventilacije i načini upravljanja kojima bi se postigli i održavali traženi oblici razvoja i širenja dima, o čemu će biti govora u slijedećem poglavlju.

Tablica 5. Faze požarnog incidenta i optimalne forme razvoja i širenja dima

Red. broj	FAZE POŽARNOG INCIDENTA	ISTOSMJERNI PROMET ³⁴		DVOSMJERNI PROMET	
		Zagušen	Protočan	Zagušen	Protočan
1.	ZAPALJENJE	-	-	-	-
2.	EVAKUACIJA I (Samospašavanje)	Stratifikacija	Kontrolirano odimljavanje u smjeru prometa	Stratifikacija	Stratifikacija
3.	EVAKUACIJA II (Spašavanje uz asistenciju)	Stratifikacija	Kontrolirano odimljavanje u smjeru prometa	Stratifikacija	Stratifikacija
4.	GAŠENJE POŽARA (Vatrogasci)	Kontrolirano odimljavanje u smjeru prometa		Kontrolirano odimljavanje prema nalogu vatrogasaca	

Iz gornje tablice evidentno je da se postupak evakuacije putnika (faze 1. i 2.) u svim varijantama odvijanja prometa preporuča obavljati u uvjetima stratificiranog širenja dima. Jedino u slučaju protočnog istosmjernog prometa predviđa se upotreba postupka kontroliranog odimljavanja. Međutim i u tom slučaju potrebno je sa velikom dozom sigurnosti utvrditi da u dijelu tunela nizstrujno od požara nije eventualno došlo do sudara, odnosno pojave drugog požara, uz već postojeći.

Za fazu gašenja požara (faza 4.), bez obzira na varijantu prometa koji se do tada odvijao u tunelu, predviđa se postupak kontroliranog odimljavanja.

³⁴ Pretpostavljeno je da se istosmjerni (jednosmjerni) promet odvija u dvocijevnim tunelima, dok se dvosmjerni promet odvija u jednocijevnim tunelima, bez obzira na postojanje paralelnih servisno/evakuacijskih cijevi.

4.4. Najbolje prakse djelovanja sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara

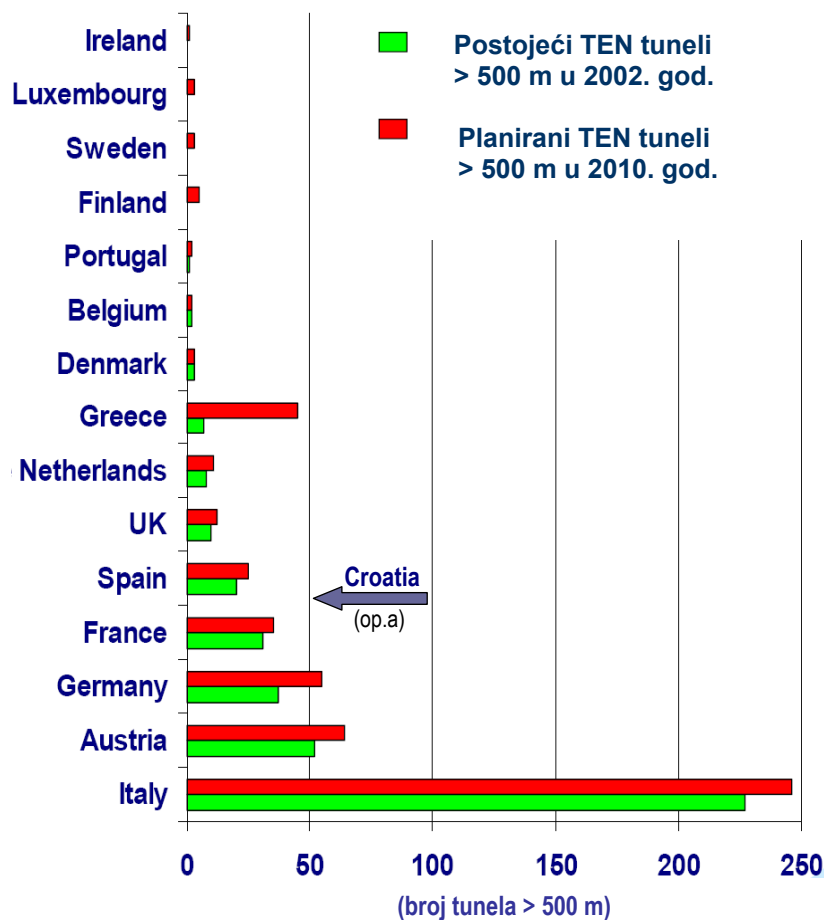
4.4.1. Uvod

Analiza najboljih praksi (*engl.* „best practices“) djelovanja sustava uzdužne ventilacije u pojedinim fazama požarnog incidenta, temelji se na recentnom pregledu najboljih praksi preuzetih iz inozemne tehničke prakse i regulative, s posebnim naglaskom na one objavljene u:

- a) dokumentima PIARC-a, a prvenstveno u izvješću *“Fire and Smoke Control in Road Tunnels“* iz 1999. [55];
- b) dokumentu *“Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels“*, izdanom od strane UN - Economic Commission for Europe u 2001. [46];
- c) dokumentima tematske mreže FIT - *“Fire in Tunnels“* iz 2003. [68];
- d) dokumentu Europske komisije *“Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network (TEN)“* [69].

Uz tradicionalni značaj PIARC-a u svim gore navedenim područjima, vrlo je koristan rad na prikupljanju podataka o požarima u tunelima, obavljen kroz spomenutu tematsku mrežu FIT. U njoj sudjeluje široka baza stručnjaka, a osnovna intencija ove mreže je diseminacija istraživačkih i razvojnih aktivnosti.

Navedenim dokumentima su obuhvaćena saznanja iz svih relevantnih zemalja u području tunelogradnje (Italija, Francuska, Švicarska, Njemačka, Austrija, Norveška, Švedska, Velika Britanija, Nizozemska i SAD), te sistematizirana u različita područja zaštite od požara (Analize rizika, Preventiva, Projektiranje, Upravljanje incidentnim situacijama i dr.). Pored gore navedenih zemalja, prema podacima kojima raspolaže autor, a temelje se na postojećem stanju tunelogradnje u Hrvatskoj i planovima za razdoblje do 2010. godine (izvor: *Hrvatske autoceste* i *Hrvatske ceste*), Hrvatska će po broju tunela ($L > 500$ m), ali i po ukupnoj duljini koja prelazi 100 km, ulaskom u EU imati značajni udio u mreži TEN-a (Slika 24.). Oprezna procjena autora je da bi Hrvatska zauzimala visoko 4. do 5. mjesto uz Francusku i Španjolsku, uključujući pritom i tunele na dionicama koje bi sačinjavale buduću Jadransko-Jonsku autocestu, pretpostavljenu kao važan pravac unutar TEN-a i budući paneuropski koridor.



Slika 24. Pregled postojećih i planiranih tunela unutar cestovne mreže TEN-a [70]

4.4.2. Pregled djelovanja sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara

Pregledom i analizom dokumenata navedenih u ovom Poglavlju, može se zaključiti da su preporuke za specifično djelovanje sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požarnog incidenta vrlo općenite i oskudne, većinom na razini normativnih dokumenata (vidi Tablicu 6.). Izuzetak su austrijske smjernica za projektiranje i izgradnju tunela [71] oznake RVS 9.261, gdje se navodi način djelovanja sustava ventilacije i konkretne vrijednosti brzina strujanja zraka koje je potrebno osigurati u početnoj fazi požara, ovisno o vrsti prometa. Međutim, ne postoje podaci o načinu djelovanja sustava ventilacije u fazi gašenja požara, kao ni podaci o kritičnoj brzini odimljavanja, iako u brojnim tehničkim publikacijama postoje poluempirijski izrazi za njen izračun. U Tablici 6. dan je pregled raspoloživih smjernica i tehničke regulative iz promatranog područja.

Matrica sadržaja inozemne tehničke regulative i smjernica⁽¹⁾

Overview of contents (Pregled sadržaja)		Italy	Germany	France	UK	Norway	Austria	Netherlands
	Available national guidelines:	0 (1)	3	1	2	2	10	5
Category	Element							
Structural measures relevant to safety (Strukturne mjere relevantne za sigurnost)								
S1 Emergency passenger exit for users	S11 Parallel escape tube	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,1,7	Ø
	S12 Emergency cross-passage	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,2,7	Ø
	S13 Shelter	Ø	O	A,1	A,1	O	O	Ø
	S14 Direct pedestrian emergency exit	Ø	A,1	A,1	A,1	O	A,7	Ø
S2 Emergency access for rescue staff	S21 Separate emergency vehicle gallery	Ø	A,1	A,1	O	O	A,7	Ø
	S22 Cross passage vehicle access	Ø	A,1	A,1	O	A,1	A,2,7	Ø
	S23 Emergency lane	Ø	A,1	A,1	A,1	O	A,1,2,7	Ø
	S24 Direct pedestrian access	Ø	O	O	O	O	O	Ø
	S25 Turning areas	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,2,7	Ø
	S27 Firemen station at portals	Ø	O	A,1	A,1	O	O	Ø
S3 Drainage of flammable liquids	S31 Inclination of tunnel axis	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,3	Ø
	S32 Separate drainage systems	Ø	A,1	O	O	A,1	O	Ø
	S33 Liquid sump	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,3	Ø
	S34 Non porous surface course	Ø	O	A,1	A,1	O	O	Ø
Safety equipment (Sigurnosna oprema)								
E1 Smoke control ventilation (Upravljanje dimom)	E 11 Natural ventilation by shafts	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,4	Ø
	E 12 Longitudinal (Uzdužna ventilacija)	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	X,4	Ø
	E 13 Transversal	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	X,4	Ø
	E 14 Ventilation control sensors	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,4	Ø
E2 Emergency exit and rescue access ventilation		Ø	A,1	A,1	A,1	O	O	Ø
E3 Lighting	E31 Emergency tunnel lighting	Ø	A,1	A,1	A,1	O	A,6	Ø
	E32 Marker light in tunnel	Ø	A,1	A,1	A,1	O	A,8	Ø
	E33 Emergency exit & rescue access lighting	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,6	Ø
E4 Signage (permanent/variable)	E41 Traffic signals outside the tunnel	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,7,8	Ø
	E42 Traffic signals inside the tunnel	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,8	Ø
	E43 Exit pedestrian signs	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,8	Ø
	E44 Rescue pedestrian signs	Ø	O	O	O	O	A,8	Ø
E5 Communication and alarm system	E51 Emergency telephone	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,7,8	Ø
	E52 Alarm push button (manual fire alarm)	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,8	Ø
	E53 Automatic alarm on equipments	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,8	Ø
	E54 Automatic incident detection	Ø	O	O	O	O	O	Ø
	E55 Fire/smoke detection	Ø	A,1	A,1	A,1	O	A,8	Ø
	E56 Radio rebroadcast	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	X,9	Ø
E57 Loudspeakers (in tunnel, in shelters)		Ø	A,1	A,1	A,1	O	A,8	Ø
E6 Traffic regulation - monitoring equipments	E61 Monitoring of traffic speed and intensity	Ø	A,1	O	A,1	A,1	A,8	Ø
	E63 Close circuit television	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,8	Ø
	E64 Remote control barriers	Ø	A,1	A,1	O	A,1	O	Ø
	E66 Thermographic portal detectors (truck)	Ø	O	O	O	O	O	Ø
E7 Power supply		Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,8	Ø
E8 Fire suppression (fire fighting)	E 81 First aid fire fighting	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,7,8	Ø
	E82 Fire fighting media	Ø	A,1	A,1	A,1	A,1	A,7,8	Ø
	E84 Fixed fire suppression system	Ø	O	O	A,1	O	O	Ø
Structure & equipment, response to fire (Struktura i oprema, reakcija i otpornost na požar)								
R1 Reaction to fire		Ø	O	A,1	O	O	O	Ø
R2 Structure resistance to fire		Ø	A,1	A,2,3	A,1	A,1	A,3	Ø
R3 Equipment resistance to fire		Ø	A,1	A,1,2,3	A,1	A,1	A,6,7,8	Ø

(1) Preuzeto u izvornom obliku iz dokumenata FIT-a [68] (autor: Niels Peter Hoj, WP3 Report, 2003.)

LEGENDA	
Ne postoje smjernice	Ø
Ne postoje zahtjevi, oskudne informacije	O
Informacije normativnog karaktera	A
Detaljne informacije ili modeli	X
Broj referenci u nacionalnoj regulativi	, n
Uže područje interesa u ovom radu	←

Tablica 6. Pregled raspoloživih nacionalnih regulativa i smjernica

Tablica 7. Usporedba zahtjeva u pogledu rada uzdužne ventilacije za slučaj požara [68]

Zemlja/ Smjernica	ZAH T J E V I
Njemačka/ RABT	2.3.5.1.2... U slučaju požara uzdužna ventilacija može biti aktivirana s ciljem da se kontrolira brzina širenja dima. 2.3.3.3... Kod dužih tunela dim se odsisava kroz otvore u svodu tunela na ograničenom broju sekcija ili potiskuje od mjesta požara u jednom smjeru. Pojedinačni odsisi kod dugih tunela mogu smanjiti širenje dima. Kod sustava uzdužne ventilacije odlučujuću ulogu za rad sustava ima prometna situacija, lokacija požara i uzdužna brzina zraka u tunelu. Kod dvosmjernih tunela i mogućih slučajeva zagušenja prometa, sustav uzdužne ventilacije se primjenjuje uz ograničenja. Iz tog razloga, za tunele duže od 600 m potrebno je izraditi analizu rizika. 2.3.3.4... Kritična brzina zraka iznosi 2,3 – 3,6 m/s (navedeno u Tablici 6., ovisno o obliku poprečnog presjeka, nagibu kolnika i požarnom opterećenju).
Francuska/ Circ 2000-63A2	3.2.2... Primjena uzdužne ventilacije moguća je kod van-urbanih istosmjernih tunela dužine do 5.000 m; urbanih istosmjernih tunela do 500 m... (za promet niskog intenziteta do 800 m); izvan-urbane istosmjerne tunele dužine do 1.000 m... (za promet niskog intenziteta do 1.500 m). Primjena uzdužne ventilacije kod dvosmjernih urbanih tunela se zabranjuje. Sustav ventilacije mora startati što je prije moguće, na način da ostvari minimalno brzinu od 3 m/s u smjeru prometa. (Kod urbanih i dvosmjernih tunela, upravljanje sustavom ventilacije može biti znatno složenije zbog potrebe održavanja stratifikacije dima).
UK/ BD78/99	Za tunele dužine 300 – 400 m, primjena mehaničke ventilacije treba biti razmotrena obzirom na kontrolu dima. Na primjer, u slučaju slabijeg intenziteta prometa i/ili malih nagiba kolnika, dužina tunela koji obično ne zahtijevaju primjenu ventilacije može biti povećana na 400 m. Primjena uzdužne ventilacije je obvezna za sve tunele duže od 400 m, te za tunele iznad 200 m ukoliko imaju veliki nagib kolnika ili su izvrnuti čestim zagušenjima prometa... 5.16 Uzdužna ventilacija je najjednostavniji oblik ventilacije tunela, koji zbog manjih investicijskih i eksploatacijskih troškova obično predstavlja prvi izbor... 5.91 Ventilatori za kontrolu strujanja zraka moraju biti reverzibilni... 5.22 Proračun kapaciteta impulsnih ventilatora treba uzeti u obzir da postignute brzine zraka moraju biti dostatne za kontrolu (upravljanje) dima. 5.74 Početna brzina širenja dimnog sloja iznosi oko 1,3 m/s za požar osobnog vozila toplinske snage 3 MW i 3 m/s za požar kamiona toplinske snage 20 MW, ovisno o geometriji tunela. Požar cisterne s gorivom snage 50 do 100 MW može generirati širenje dima brzinom od 7,0 m/s i više, što zahtjeva veliko i vrlo skupo ventilacijsko postrojenje koji bi bilo u stanju zadovoljiti postavljene zahtjeve.
Norveška/ Road Tunnels	1002.1 Mehanička uzdužna ventilacija... se temelji na primjeni impulsnih ventilatora. U dugačkim tunelima s intenzivnim prometom, odnosno tamo gdje postoje izvjesna ograničenja, potrebno je razmotriti upotrebu ventilacijskih okana.
Austrija/ RVS	Za dimenzioniranje sustava ventilacije potrebno je uzeti u obzir redovni pogon i pogon za slučaj incidenta-požara. Tri su osnovna cilja korištenja ventilacije za slučaj požara: - omogućiti dovoljno dugo vrijeme za samo-evakuaciju putnika, - osigurati povoljne uvjete za intervenciju vatrogasaca, - smanjiti opseg štete (za osobe, vozila i građevinu tunela). 4.3.1 Uzdužna ventilacija • Ventilatore treba dimenzionirati tako da su reverzibilni i da su stanju u slučaju požara postići brzinu strujanja od 1,5 m/s, tj. minimalnu volumnu struju zraka od 80 m³/s. • Kako bi se povećala sigurnost rada pri uvjetima požara te smanjila mogućnost turbulencije, ventilatori se raspoređuju po cijeloj duljini tunela. 5. Tehnički zahtjevi... Ukoliko su ventilatori predviđeni za rad u slučaju požara, isti moraju tijekom 60 min., pri temperaturi od 250° C zadržati svoju radnu sposobnost... 7.4.2 Slučaj požara... Za tunele koji imaju ventilacijska postrojenja, potrebno je osim uključivanja nadležnih vatrogasnih jedinica, razviti i posebne programe za slučaj požara. Ti se programi u slučaju požara moraju odvijati automatski sve do dolaska vatrogasaca... 7.5.1 Uzdužna ventilacija u slučaju jednosmjernog prometa... U slučaju požara je potrebno smanjiti brzinu strujanja zraka u smjeru gibanja vozila na 1,0 do 1,5 m/s. 7.5.2 Uzdužna ventilacija u slučaju dvosmjernog prometa... Brzina strujanja zraka u tunelskom prostoru mora se moći smanjiti na 1,0 do 1,5 m/s, kako bi se što duže eliminirao dim sa putova za evakuaciju.

U vezi s kritičnom brzinom odimljavanja, potpunije podatke daju njemačke smjernice RABT [72], u kojima se nalaze podaci o potrebnoj kritičnoj brzini odimljavanja, u ovisnosti o obliku poprečnog presjeka, nagibu kolnika i standardiziranom požarnom opterećenju, tj. toplinskoj snazi požara izraženoj u MW (vidi Tablicu 8.).

Tablica 8.⁽¹⁾ Kritične brzine zraka pri odimljavanju prema RABT

Nagib	Poprečni presjek	Snaga požara [MW]		
		30	50	100
0-1%	Pravokutni	2,3	2,6	2,9
	Kružni	2,5	2,8	3,1
1-3%	Pravokutni	2,5	2,8	3,1
	Kružni	2,6	2,9	3,3
3-6%	Pravokutni	2,7	3	3,3
	Kružni	2,8	3,1	3,6

⁽¹⁾ veza s Tablicom 7, vidi: Njemačka/RABT

Prilikom analize dostupnih dokumenata iz predmetnog područja, dolazi se do zaključka da niti u jednom od njih ne postoji cjelovita i detaljna preporuka za rad sustava ventilacije u uvjetima požara, koja bi se mogla nazvati „operativnom strategijom rada ventilacijskog sustava“. Razlozi za to su razumljivi, jer autori smjernica i odgovarajuće tehničke regulative objektivno ne mogu preuzeti odgovornost za definiranje djelovanja nekog konkretnog sustava u uvjetima tako nepredvidivog i složenog procesa kao što je požar.

Naime, definiranje „operativne strategije“ određenog sustava na razini tehničke regulative ili smjernica, zahtijevalo bi visoku fazu integracije brojnih postupaka i procedura s nizom karakterističnih detalja, što nije svojstveno uobičajenom sadržaju tehničke regulative. Nadalje, time bi se vjerojatno zašlo i u područje odgovornosti i stručne kreativnosti projektanta, što svakako nije cilj autorima tehničke regulative i smjernica, kojima se daju samo okviri za rad određenog sustava. Ukoliko se u tehničkoj regulativi iz ovog područja i navode konkretni numerički podaci, radi se o provjerenim, opće prihvaćenim vrijednostima, koje definiraju određeni parametar procesa ili njegov prihvatljivi interval, bez njegovog povezivanja s ostalim procesima u niz uzročno-posljedičnih radnji, koje su svojstvene pojmu „operativne strategije“. Za njeno konačno definiranje potrebno je prvo uspostaviti konsenzus među članicama PIARC-a u vezi s nizom tehničkih i organizacijskih pitanja koja se odnose na rad sustava ventilacije u uvjetima požara.

Pokušaj cjelovitijeg sagledavanja rada ventilacijskog sustava u uvjetima požara daje već spomenuti PIARC (vidi Tablicu 9.). Međutim, kako se PIARC koristi samo s usuglašenim stavovima svih zemalja članica, navedene preporuke za rad sustava uzdužne ventilacije su vrlo općenite, bez numeričkih vrijednosti koje su dragocjene projektantima ventilacijskih sustava. U tijeku je, kroz rad ekspertne skupine WG 6, izrada preporuka za rad sustava ventilacije u uvjetima požara, za koje će očekuje da će biti detaljnije i bogatije numeričkim podacima.

Tablica 9. Preporuke PIARC-a za rad sustava uzdužne ventilacije za slučaj požara [55]

UZDUŽNA VENTILACIJA	EVAKUACIJSKE FAZE (II + III)	FAZA GAŠENJA POŽARA (IV)
1 - CIJEVNI TUNEL s dvosmjernim prometom	Stratifikacija dima ne smije biti poremećena: - uzdužna brzina zraka prilično mala - ventilatori ne rade u zoni dima	Spriječiti povratno strujanje dima („backlayering“): - viša uzdužna brzina zraka - smjer strujanja prilagodljiv
2 - CIJEVNI TUNEL s istosmjernim prometom	• Protočni promet Spriječiti povratno strujanje dima: dovoljna uzdužna brzina zraka u smjeru odvijanja prometa. • Zagušeni promet ili požar na kraju kolone iza mjesta nesreće Isto kao kod 1-cijevnog tunela s dvosmjernim prometom, u dvije faze.	

4.4.3. Izbor požarnog opterećenja

Najveći broj zemalja, kao projektno požarno opterećenje mjerodavno za dimenzioniranje sustava ventilacije, u slučaju da ne postoji značajna opasnost požara cisterni s gorivom, uzima vrijednost od 30 MW, što odgovara požaru teretnog vozila sa srednje gorivim teretom, odnosno požaru autobusa.

Kombinirajući različite podatke s brojnih ispitivanja o požaru u tunelima (požarni testovi u sklopu projekta EUREKA - EU 499, testiranja požara cisterni od strane KIVI³⁵, testovi u Oresund tunelu i dr.), koje je objavio PIARC [55], dobiva se Tablica 10. Njome se nastoje sistematizirati temeljne termodinamičke veličine požara za različite vrste vozila. Pri tome treba upozoriti da se radi o rezultatima ispitivanja koja nisu provedena po jedinstvenoj metodologiji, te su moguća izvjesna odstupanja od rezultata objavljenih u drugim izvorima.

³⁵ engl. "Royal Institute of Engineers" (KIVI), Nizozemska

Tablica 10. Usporedbene karakteristike požara za različite vrste vozila

VRSTA VOZILA	TOPLINSKA SNAGA HRR (MW)	TRAJANJE POŽARA (min.)	KOLIČINA DIMNIH PLINOVA (m ³ /s)
Osobno vozilo	2,5 – 5	45	20
2-3 osobna vozila	8	-	30
Kamionet/kombi	15	-	50
Autobus	20 – 30	60	50 – 60
Teretno vozilo sa srednje gorivim teretom	30 – 50 (100 ⁽¹⁾)	90	50 – 90
Cisterna za prijevoz goriva	200 - 300	180	200 – 300 i više

⁽¹⁾ Navedene vrijednosti su bitno veće od onih koje navodi PIARC (1999.). Njihovo uvrštavanje u Tablicu 9 je posljedica saznanja o rezultatima najnovijih ispitivanja u Runehamar tunelu [73] (Norveška, 2003. godine), koja ukazuju da je oslobođena toplinska energija požara teretnog vozila s teretom od drvenih paleta i PE ambalaže, ukupne mase 6.125 kg, iznosila 207 GJ. Za ilustraciju, oslobođena toplinska energija požara autobusa iznosi oko 41 GJ!

Kao što je vidljivo iz gornje tablice, raspon mogućih požarnih opterećenja je izuzetno velik (oko 1:100), te stoga posebnu pažnju treba posvetiti **prometnom modelu** na temelju kojeg će se dimenzionirati djelovanje sustava ventilacije u uvjetima požara. Posebno je nedefiniran termin „teretnih vozila“, zbog izuzetne raznolikosti tereta kojeg mogu prevoziti, te konzekventno tome i požara koji nastaje samozapaljenjem ili sudarom ovih vozila.

No, osim prometnog modela, potrebno je usvojiti i **evakuacijski model**, koji između ostalog definira „sigurno vrijeme evakuacije“ i odgovarajuću brzinu intervencije vatrogasaca, odnosno vrijeme koje im je potrebno da započnu s intervencijom gašenja (IV faza požara). Naime, gore navedene toplinske snage požara predstavljaju maksimalne vrijednosti, koje odgovaraju razvijenom požaru, a koje je moguće pravovremenom intervencijom vatrogasaca reducirati na znatno niže vrijednosti. Važnost vremena unutar kojeg vatrogasci pristupaju gašenju, vidljiva je iz izraza koji opisuje vremenski razvoj požara, odnosno povećanje toplinske snage požara Q kao funkcije vremena t :

$$Q(t) = \alpha \cdot t^2 \quad (8.1)$$

Prema izrazu (8.1), toplinska snaga požara raste sa kvadratom vremena, te je stoga skraćivanje vremena intervencije od presudnog značaja za uspješnost postupka gašenja.

Koristeći gornji izraz, a temeljem brojnih požarnih testova vozila u realnim uvjetima, moguće je odrediti koeficijent α za različite vrste vozila, a time i vremensku funkciju rasta požarne snage za različite grupe vozila [74].

Za osobna vozila:

$$Q(t) = \alpha \cdot t^2 \quad \rightarrow \quad \text{u intervalu za } t \leq 20 \text{ min.}; \alpha = 0,0056 \text{ kW/s}^2$$

$$Q(t) = \text{const.} \quad \rightarrow \quad \mathbf{8 \text{ MW}} \text{ u intervalu } 20 \text{ min.} < t < 40 \text{ min.}$$

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot e^{-\beta \left(t - \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\alpha}} \right)} \quad (8.2) \quad \rightarrow \quad \text{za } t \geq 40 \text{ min.}; \beta = 0,0007 \text{ s}^{-1}$$

Za teretna vozila:

- teretno vozilo 1 (HGV 1), kalorična moć tereta 65 GJ

$$Q(t) = \alpha \cdot t^2 \quad \rightarrow \quad \text{u intervalu za } t \leq 15 \text{ min.}; \alpha = 0,025 \text{ kW/s}^2$$

$$Q(t) = \text{const.} \quad \rightarrow \quad \mathbf{20 \text{ MW}} \text{ u intervalu } 15 \text{ min.} < t < 60 \text{ min.}$$

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot e^{-\beta \left(t - \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\alpha}} \right)} \quad \rightarrow \quad \text{za } t \geq 60 \text{ min.}; \beta = 0,0007 \text{ s}^{-1}$$

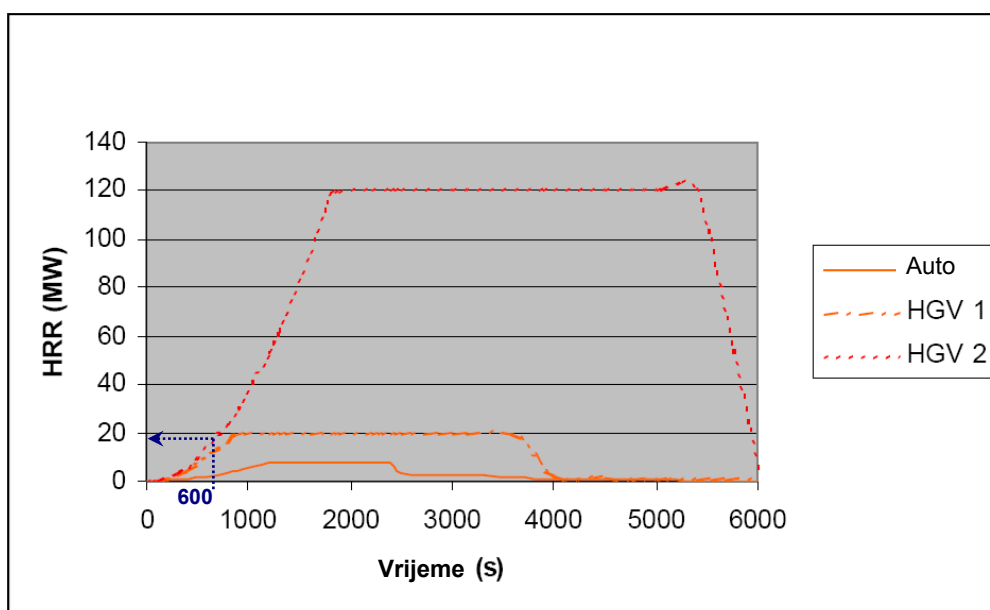
- teretno vozilo 2 (HGV 2), kalorična moć tereta 87 GJ

$$Q(t) = \alpha \cdot t^2 \quad \rightarrow \quad \text{u intervalu za } t \leq 30 \text{ min.}; \alpha = 0,037 \text{ kW/s}^2$$

$$Q(t) = \text{const.} \quad \rightarrow \quad \mathbf{120 \text{ MW}} \text{ u intervalu } 30 \text{ min.} < t < 90 \text{ min.}$$

$$Q(t) = Q_{\max} \cdot e^{-\beta \left(t - \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\alpha}} \right)} \quad \rightarrow \quad \text{za } t \geq 90 \text{ min.}; \beta = 0,0007 \text{ s}^{-1}$$

Varijante vremenskih funkcija požarne snage teretnih vozila, obzirom na raznolikost tereta su brojne, a u gornjim izrazima su opisana samo dva karakteristična slučaja, uz primjer jednoznačnije određene funkcije za osobna vozila. No, sve prezentirane vremenske funkcije su navedene kao ilustracija naglog porasta požarne snage u ovisnosti o vremenu (vidi Sliku 25.). Shodno tome, potrebno je intervenciju vatrogasaca i pristupanje gašenju obaviti u što kraćem vremenu, kada požar još nije postigao svoju maksimalnu snagu!



Slika 25.* Vremenska funkcija rasta toplinske snage požara (HRR) za različite tipove vozila [74]
(*dopuna autora)

Kao primjer, ukoliko se intervencija vatrogasaca izvrši unutar 10 minuta (600 s), iz dijagrama porasta požarne snage na Slici 25. vidljivo je da i u slučaju najvećeg analiziranog požara za teretno vozilo HGV 2, požarno opterećenje u navedenom intervalu neće dostignuti 20 MW, a te vrijednosti požara vatrogasci mogu uspješno savladati rutinskom intervencijom.

Ipak, potrebno je napomenuti da postoje mogući požarni scenariji, kod kojih i navedeno, relativno kratko vrijeme predviđeno za vatrogasnu intervenciju, dolazi u pitanje. Radi se o požaru cisterne s tekućim gorivom, kod koje pod određenim uvjetima zagrijavanja plašta cisterne može doći do BLEVE³⁶ efekta, tj. eksplozije suhozasićenih i pregrijanih para goriva neposredno nakon uništenja strukture spremnika i gotovo trenutne oksidacije para s okolnim zrakom. Efekti BLEVE eksplozije su izuzetno razorni i do sada se nisu, prema saznanju autora, ispitivali u tunelima, već samo na otvorenom prostoru. Opisani BLEVE efekt se obično pojavljuje u vremenu od 5 – 20 minuta nakon pojave požara, što znači da je vrijeme intervencije vatrogasaca kod ovoga požarnog scenarija presudno za daljnji tijek požarnog incidenta!

³⁶ akronim BLEVE (*engl.* **B**oiling **L**iquid **E**xpanding **V**apor **E**xplosion)

Opisani požarni scenarij treba se promatrati ne samo kao slučajni događaj-nesreća, već i kao stvarna mogućnost terorističke ugroze [75], s mogućim katastrofalnim posljedicama. Podrazumijeva se da za takve scenarije, ne vrijede do sada obavljene analize u ovom radu, odnosno treba ih primijeniti uz veliku dozu rezerve.

Premda se većina inozemnih smjernica ne referira izravno na vrijeme potrebno za intervenciju vatrogasaca, prije navedene austrijske smjernice za projektiranje tunela RVS 9.261, (toč. 4.2.3 - *Popis sigurnosno-tehničkih mjera*), prilikom izračuna koeficijenta sigurnosti tunela posebno vrednuju trajnu nazočnost vatrogasaca na udaljenosti manjoj od 5 km od portala kada se radi o izvan-urbanim tunelima, odnosno manjoj od 1,5 km kada se radi o tunelima u gradskom području.

- (!) **Brzina intervencije vatrogasaca, tj. pristupanja gašenju požara jedan je od odlučujućih uvjeta za uspješnost vatrogasne intervencije i stavljanje požara pod kontrolu u njegovoj početnoj fazi. Sukladno tome, svaka sigurnosna strategija zaštite tunela od požara, a time i operativna strategija sustava ventilacije u uvjetima požara mora nastojati ubrzati intervenciju vatrogasaca!**

4.5. Uloga sustava uzdužne ventilacije u tipičnim požarnim scenarijima

Za potrebe oblikovanja operativne strategije ventilacijskog sustava u uvjetima požara potrebno je proanalizirati njegovu ulogu u tipičnim požarnim scenarijima. Naime, bez obzira na značajan broj potencijalnih događaja na terenu, moguće je detaljnijom analizom grupe incidentnih događaja svesti na tipične požarne scenarije, sukladno postupku opisanom na str. 31., Poglavlje 4.1.1. Tipični scenariji omogućuju jednaki odziv sustava ventilacije na pojavu određenih događaja i to korištenjem tipskih tj. standardiziranih upravljačkih algoritama. Identifikacija i razrada navedenih standardiziranih upravljačkih algoritama prikazana je u Poglavlju 2, a njihovo „uvezivanje“ u jedinstvenu operativnu strategiju, prikazanu kroz generičke algoritme upravljanja (vidi Prilog 2), jedan je od osnovnih ciljeva ovoga rada.

Događaji, koji su obuhvaćeni određenim tipičnim scenarijem, uvelike su uvjetovani građevinskim karakteristikama tunela, te shodno tome usvojenim prometnim i evakuacijskim modelima. Uvažavajući ove činjenice, tipični scenariji požara odnosit će se na 2 osnovna slučaja i njihove podvarijante:

1) požarni incident u dvocijevnom tunelu s:

- a) istosmjernim tekućim prometom;
- b) istosmjernim prometom u uvjetima zagušenja/zastoja;
- c) dvosmjernim prometom u jednoj cijevi, dok druga cijev nije u funkciji (fazna izgradnja, rekonstrukcija, održavanje).

2) požarni incident u jednocjevnom tunelu s:

- a) dvosmjernim tekućim prometom;
- b) dvosmjernim prometom u uvjetima zagušenja/zastoja.

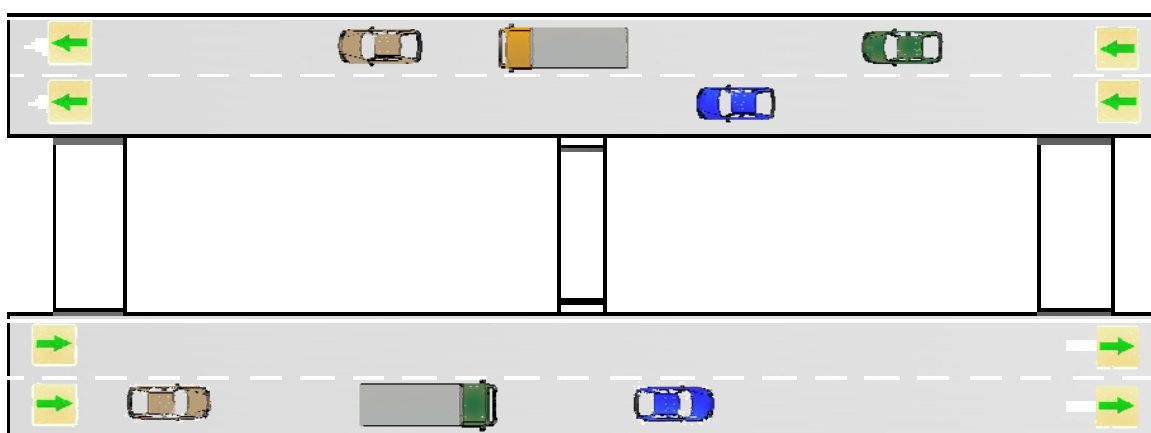
Navedena varijanta 1c) odvijanja prometa u 2-cijevnom tunelu je netipična (izvanredna) varijanta odvijanja prometa za ovu vrstu tunela i po svemu je gotovo identična varijantama 2a) i 2b), ako analiziramo stanje u samoj prometnoj cijevi. Jedina se razlika pojavljuje u vezi s uvjetima evakuacije putnika, koji su u najvećem broju analiziranih segmenata povoljniji kod 2-cijevnog tunela.

4.5.1. Tipični požarni scenarij u dvocijevnom tunelu

Kao što je već navedeno u prethodnom poglavlju 4.5., razmatrat će se različiti prometno-evakuacijski modeli u uvjetima požara, unutar građevinski zadane konfiguracije 2-cijevnog tunela, uz istodobnu analizu rada ventilacijskog sustava.

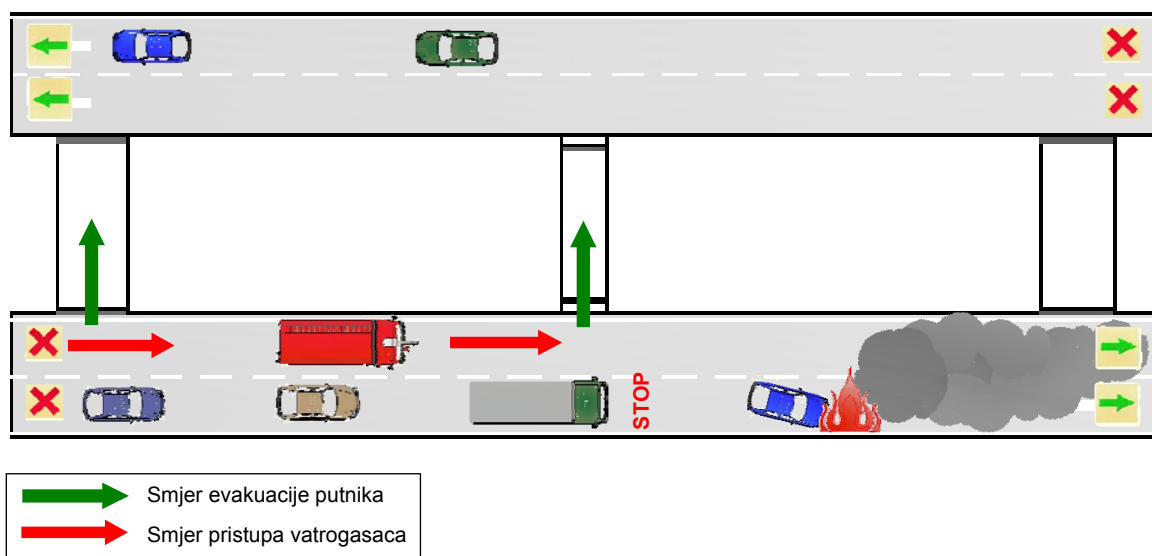
4.5.1.1. Prometno - evakuacijski modeli istosmjernog prometa

- Redovni pogon



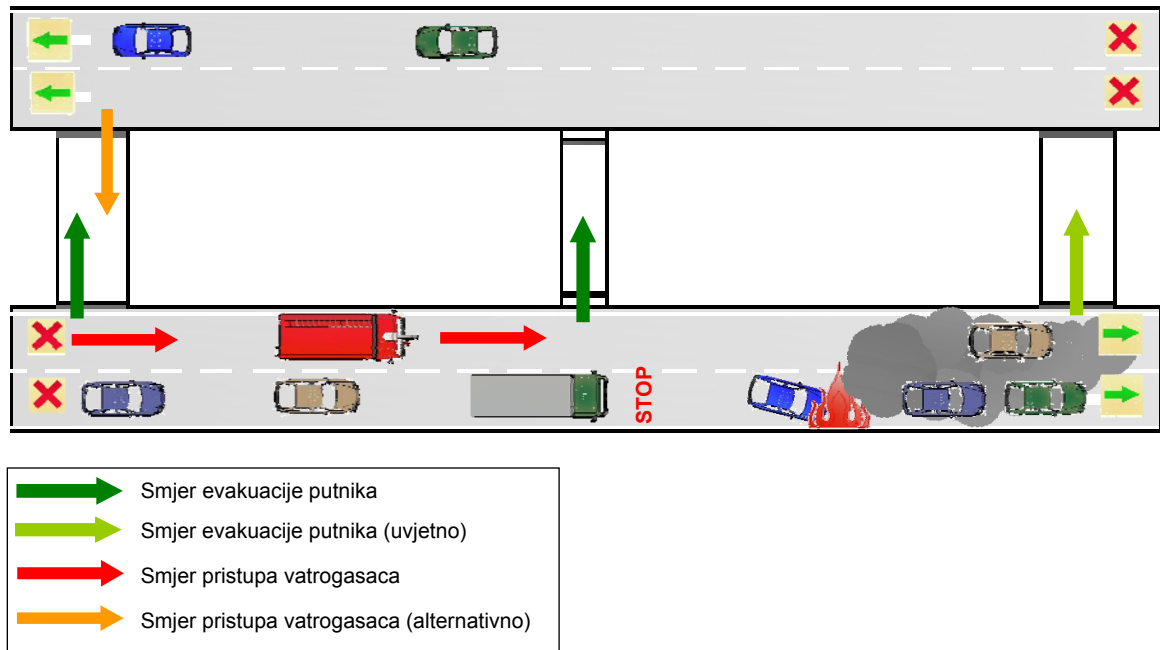
Slika 26. Stanje prometa prije pojave požara

- Požar u uvjetima tekućeg prometa



Slika 27.a Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima tekućeg prometa
(Napomena: udar vozila u betonsku oblogu tunela!)

- **Požar u uvjetima zastoja/zagušenja prometa**



Slika 27.b Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima zastoja/zagušenja prometa
(Napomena: udar vozila u betonsku oblogu tunela!)

- **Analiza rada ventilacijskog sustava**

Redovni pogon: U uvjetima istosmjernog prometa u dvocijevnim tunelima sustav uzdužne ventilacije, po potrebi, svojim radom pospješuje uspostavljeno prirodno strujanje u tunelu, koje se javlja kao posljedica prolaska vozila kroz tunel (tzv. „efekt klipa“) i meteoroloških utjecaja. Obzirom da je utjecaj gibanja vozila najčešće dominantan, smjer strujanja se u pravilu poklapa sa smjerom odvijanja prometa.

Požarni režim rada: U slučaju požarnog incidenta u jednoj od cijevi, dim će se zbog inercije prethodno uspostavljenog gibanja u najvećem broju slučajeva širiti u smjeru odvijanja prometa, te će na taj način osobe koje se pravovremeno zaustave ispred mjesta nesreće („STOP“), tj. uzstrujno od požara, biti sigurne od utjecaja dima i temperature. Samo u slučaju vrlo slabog prometa i istovremeno takvih meteoroloških prilika koje generiraju gradijent tlaka na portalima tunela suprotan od smjera prometa, strujanje dima će biti u smjeru suprotnom smjeru odvijanja prometa, te može ugroziti i zaustavljena vozila ispred mjesta požara.

Sukladno prethodno iznesenom stanju, razlikujemo slijedeće scenarije djelovanja ventilacijskog sustava:

- Ukoliko se promet odvija bez zastoja (Slika 27.a), vozila koja se nalaze nizstrujno od požara neometano će napustiti tunel, zadržavajući svoj smjer vožnje. U navedenim uvjetima sustav ventilacije treba odmah po detekciji požara i eventualnoj potvrdi alarma prijeći u režim kontroliranog odimljavanja, sa smjerom koji se poklapa sa smjerom vožnje. Time će putnici zatečeni uzstrujno od mjesta požara u sigurnim uvjetima obaviti evakuaciju kroz poprečne prolaze u drugu cijev.
- Ukoliko je promet u zastoju/zagušenju (Slika 27.b), vozila koja se nalaze nizstrujno od požara bit će uhvaćena u klopu jer ne mogu zbog kolone napustiti tunel. U navedenim uvjetima sustav ventilacije treba odmah po detekciji požara i eventualnoj potvrdi alarma prijeći u režim smirivanja uzdužnog strujanja zraka, čime će se ostvariti uvjeti da evakuacija putnika bude obavljena uz stratifikaciju dima, uz što manju brzinu širenja. Svakako da su uvjeti evakuacije u ovom slučaju znatno nepovoljniji nego za slučaj protočnog istosmjernog prometa, jer se brzina širenja dima ne može trenutno reducirati na prihvatljivu razinu od $1,0 \div 1,5$ m/s. Osim toga, realno je za pretpostaviti da će unutar vremena, potrebnog za detekciju i eventualnu potvrdu alarma, doći do nekontroliranog nizstrujnog (iznimno uzstrujnog!) širenja dima koji ugrožava vozila zatečena u koloni. Unatoč tome, mišljenje autora je da se aktivnim djelovanjem sustava ventilacije u cilju smanjenja uzdužne brzine, uz zadržavanje zatečenog smjera strujanja, može bitno smanjiti rizik za putnike u svim vozilima koja stoje ili se usporeno kreću.

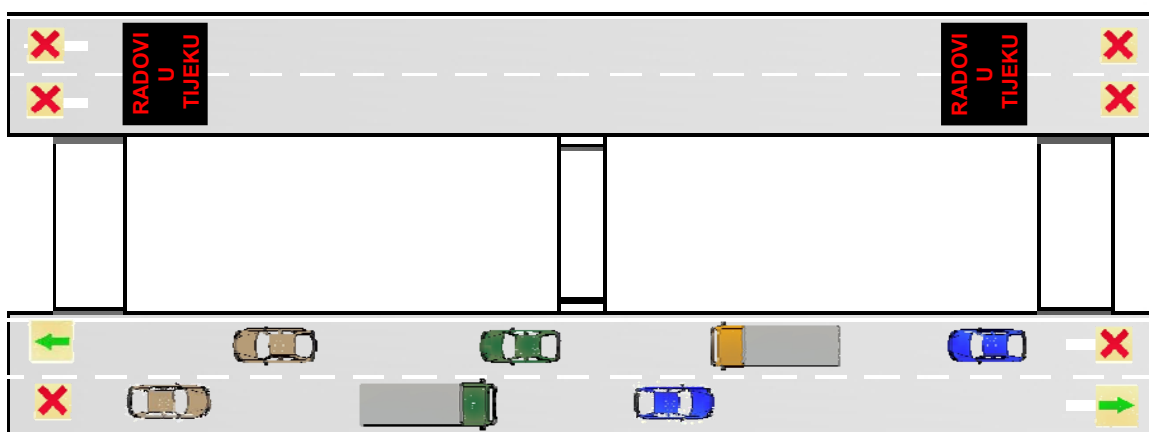
Osim kontrole širenja dima, aktivno djelovanje sustava ventilacije na smanjenje uzdužne brzine strujanja zraka izravno utječe i na dinamiku procesa izgaranja, na taj način da se smanjenom dobavom svježeg zraka (kisika) usporava proces izgaranja, a time smanjuje i toplinski učinak požara, odnosno njegova toplinska snaga!

Po dolasku vatrogasne postrojbe na teren i utvrđivanja da je evakuacija završena, pristupit će se gašenju, a sustav ventilacije prelazi u režim kontroliranog odimljavanja, u smjeru koji odredi zapovjednik vatrogasne postrojbe na terenu. Zbog zagušenja prometa, alternativni pristup vatrogasnih vozila moguć je iz paralelne tunelske cijevi, slobodne od vozila, kroz poprečne prolaze za vozila.

4.5.1.2. Prometno - evakuacijski modeli dvosmjernog prometa

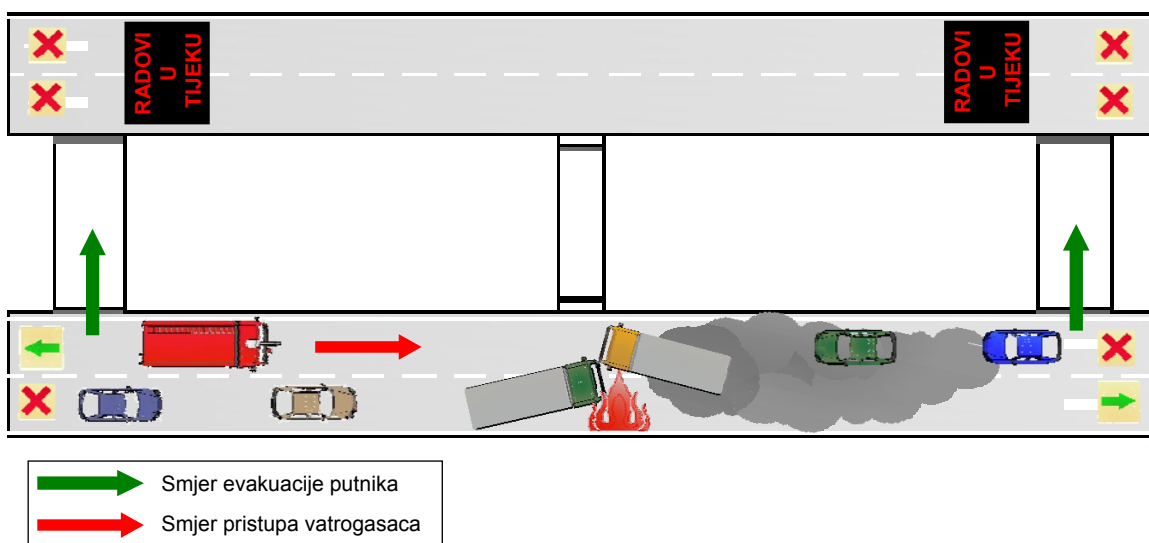
U uvjetima odvijanja dvosmjernog prometa u dvocijevnom tunelu, potrebno je napomenuti da se slika incidenta bitno ne mijenja u ovisnosti o protočnosti prometa, kao što je to bio slučaj kod istosmjernog prometa. Donekle se samo mijenja smjer pristupa vatrogasaca u uvjetima zagušenog prometa, kada ne mogu pristupiti kroz vozilima ispunjenu cijev u kojoj je došlo do požara, već moraju pristupiti kroz tunelsku cijev u kojoj se odvijaju radovi.

- Redovni pogon (uvjetno, radi se privremenom rješenju!)



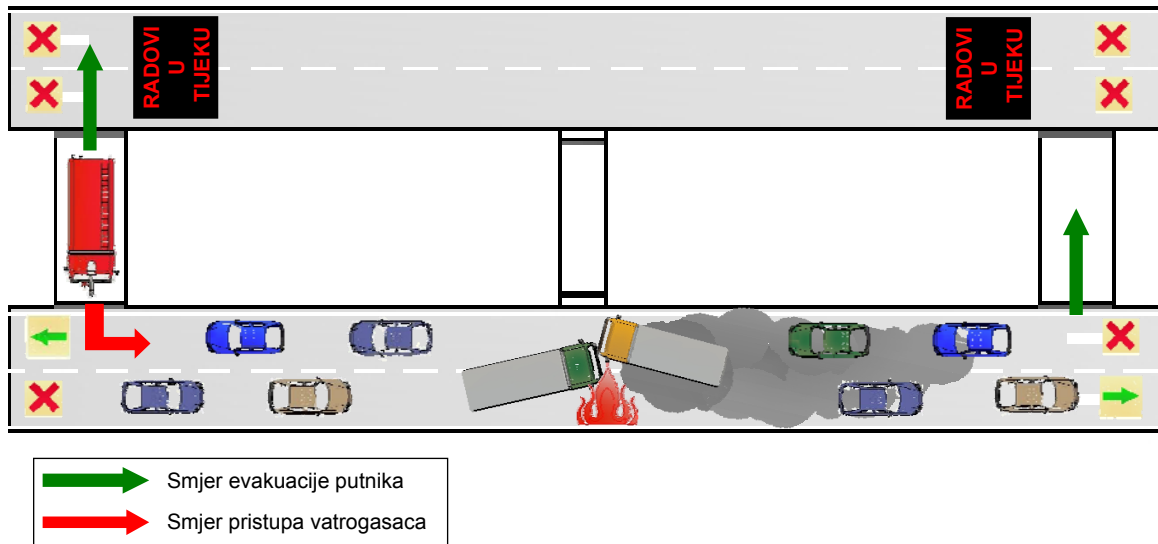
Slika 28. Stanje prometa prije pojave požara

- Požar u uvjetima tekućeg prometa



Slika 29.a Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima tekućeg prometa
(Napomena: izravni sudar teretnih vozila!)

- **Požar u uvjetima zastoja/zagušenja prometa**



Slika 29.b. Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima zastoja/zagušenja prometa
(Napomena: izravni sudar teretnih vozila!)

- **Analiza rada ventilacijskog sustava**

Redovni pogon: U uvjetima dvosmjernog prometa u dvocijevnim tunelima sustav uzdužne ventilacije svojim radom u pravilu pospješuje uspostavljeno strujanje u tunelu, koje se javlja kao posljedica prolaska vozila kroz tunel (tzv. „efekt klipa“) i meteoroloških utjecaja. Smjer strujanja može biti u oba smjera i teško ga je predvidjeti u navedenim uvjetima odvijanja prometa. Obzirom da dvosmjerni promet negativno utječe na efikasnost rada ventilacijskog sustava, u pravilu se koristi znatno veći broj ventilatora da bi se postigli isti efekti provjetravanja tunela u usporedbi s istosmjernim prometom.

Požarni režim rada: U slučaju požarnog incidenta u cijevi u kojoj se odvija promet, dim će se širiti u smjeru uspostavljenog strujanja, koje se ne može unaprijed znati, pogotovo ako se radi o ravnomjernom, uravnoteženom dvosmjernom prometom. No, za razliku od istosmjernog prometa, gdje se režim rada ventilacijskog sustava bitno razlikovao za slučajeve protočnog i zagušenog prometa, u slučaju dvosmjernog prometa djelovanje sustava ventilacije je jednako za oba slučaja prometovanja (Slika 29.a i 29.b).

U navedenim uvjetima, sustav ventilacije treba odmah po detekciji požara i eventualnoj potvrdi alarma prijeći u režim smirivanja uzdužnog strujanja zraka, čime će se ostvariti uvjeti da evakuacija putnika bude obavljena uz stratifikaciju dima, uz što manju brzinu njegovog širenja (identično radu ventilacije pri uvjetima zagušenog istosmjernog prometa!). Iako je već konstatirano da se slika požarnog incidenta bitno ne mijenja u ovisnosti o gustoći prometa, evidentno je da je zagušenje dvosmjernog prometa najnepovoljniji mogući scenarij odvijanja prometa. U takvim uvjetima, vozila koja se gibaju u smjeru napuštanja mjesta požara, tj. izlaska iz tunela, nisu u mogućnosti dovoljno brzo napustiti tunel i bivaju ugrožena dimom. I drugo, vozila koja prilaze mjestu požara s obje strane, moraju stati jer im je prolaz blokiran vozilima koja sudjeluju u sudaru. Zbog toga će broj zatečenih putnika u tunelu pri ovim uvjetima prometovanja biti maksimalan, uvjeti odvijanja evakuacije najteži, pa prema tome i posljedice požara najozbiljnije! Eventualno povećanje protočnosti prometa dovelo bi do smanjenja broja putnika zatečenih u požarom ugroženoj cijevi, što je poželjno, međutim režim rada ventilacijskog sustava nema potrebe zbog toga mijenjati, jer u svakom slučaju je dio putnika u zaustavljenim vozilima i onima koja se usporeno kreću ugrožen širenjem dima!

Po dolasku vatrogasne postrojbe na teren i utvrđivanja da je evakuacija završena, pristupit će se gašenju, a sustav ventilacije prelazi u režim kontroliranog odimljavanja, u smjeru koji odredi zapovjednik vatrogasne postrojbe na terenu. Realno je za očekivati da će vatrogasci pristupiti požarištu kroz drugu (paralelnu) cijev, koja je slobodna od prometa. Uvjet ovakvom pristupu je da radovi koji se odvijaju u paralelnoj tunelskoj cijevi ne sprječavaju prolaz vatrogasnih vozila i evakuaciju putnika.

4.5.2. Tipični požarni scenarij u jednocjevnom tunelu

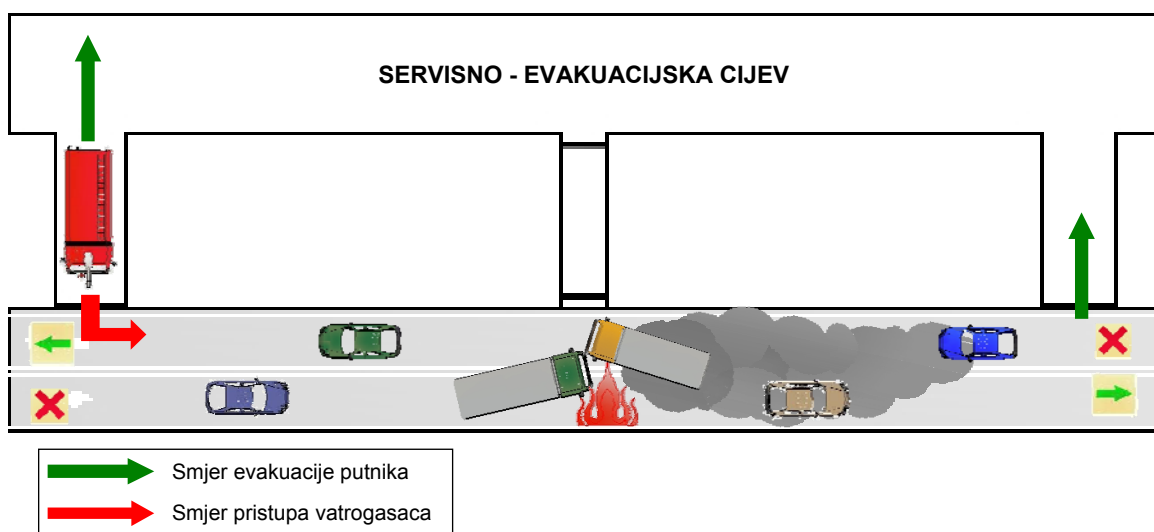
Kao što je već obrazloženo u uvodnom dijelu Poglavlja 4.5., odvijanje dvosmjernog prometa u jednocjevnom tunelu je sa stajališta prometnog i evakuacijskog modela gotovo identično odvijanju dvosmjernog prometa u jednoj cijevi dvocijevnog tunela. Pri tome je potrebno napomenuti da se izvedba jednocjevnog tunela bez paralelnog servisno-evakuacijskog tunela ne analizira kao mogući reprezentativni scenarij, obzirom da takve izvedbe tunela više ne zadovoljavaju osnovne sigurnosne kriterije.

- Redovni pogon



Slika 30. Stanje prometa prije pojave požara

- Požar u uvjetima tekućeg prometa, odnosno zastoja/zagušenja prometa



Slika 31. Stanje neposredno nakon pojave požara
(Napomena: izravni sudar teretnih vozila!)

- ***Analiza rada ventilacijskog sustava***

Redovni pogon: U uvjetima dvosmjernog prometa u jednocjevnim tunelima sustav uzdužne ventilacije svojim radom u pravilu pospješuje uspostavljeno strujanje u tunelu, koje se javlja kao posljedica prolaska vozila kroz tunel (tzv. „efekt klipa“) i meteoroloških utjecaja. Smjer strujanja može biti u oba smjera i teško ga je predvidjeti u navedenim uvjetima odvijanja prometa. Obzirom da dvosmjerni promet negativno utječe na efikasnost rada ventilacijskog sustava, u pravilu se koristi znatno veći broj ventilatora da bi se postigli isti efekti provjetravanja tunela u usporedbi s istosmjernim prometom.

Požarni režim rada: U slučaju požarnog incidenta u prometnoj cijevi, dim će se širiti u smjeru uspostavljenog strujanja, koje se ne može unaprijed znati, pogotovo ako se radi o ravnomjernom, uravnoteženom dvosmjernom prometu. No, za razliku od istosmjernog prometa, gdje se režim rada ventilacijskog sustava bitno razlikovao za slučajeve protočnog i zagušenog prometa, u slučaju dvosmjernog prometa djelovanje sustava ventilacije je identično za oba slučaja (Slika 31.).

U navedenim uvjetima, sustav ventilacije treba odmah po detekciji požara i eventualnoj potvrdi alarma prijeći u režim smirivanja uzdužnog strujanja zraka, čime će se ostvariti uvjeti da evakuacija putnika bude obavljena uz stratifikaciju dima, uz što manju brzinu njegovog širenja (identično radu ventilacije pri uvjetima zagušenog istosmjernog prometa!). Iako je već konstatirano da se slika požarnog incidenta bitno ne mijenja u ovisnosti o gustoći prometa, evidentno je da je zagušenje dvosmjernog prometa najnepovoljniji mogući scenarij odvijanja prometa. U takvim uvjetima, vozila koja se gibaju u smjeru napuštanja mjesta požara, tj. izlaska iz tunela, nisu u mogućnosti dovoljno brzo napustiti tunel i bivaju ugrožena dimom. S druge strane, vozila koja prilaze mjestu požara s obje strane, moraju stati jer im je prolaz blokiran vozilima koja sudjeluju u sudaru. Zbog toga će broj zatečenih putnika u tunelu pri ovim uvjetima prometovanja biti maksimalan, uvjeti odvijanja evakuacije najteži, pa prema tome i posljedice požara najozbiljnije! Eventualno povećanje protočnosti prometa dovelo bi do smanjene koncentracije zatečenih putnika u požarom ugroženoj cijevi, što je poželjno, međutim režim rada ventilacijskog sustava nema potrebe zbog toga mijenjati, jer u svakom slučaju je dio putnika u zaustavljenim vozilima i onima koja se usporeno kreću ugrožen širenjem dima!

Iako na prvi pogled izgleda paradoksalno, potrebno je naglasiti da su uvjeti evakuacije onih putnika koji su uspjeli napustiti požarom ugroženu cijev ulaskom u poprečne pješačke prolaze, u ovom evakuacijskom modelu povoljniji nego kod klasičnih dvocijevnih tunela s istosmjernim prometom. Razlog tome leži u činjenici da je servisno-evakuacijska cijev u potpunosti slobodna od prometa i da je stoga mogućnost naleta vozila na putnika koji se evakuiira svedena na minimum. Prometovanje ovom cijevi dozvoljava se samo interventnim službama koje su obučene za djelovanje u ovakvim izvanrednim situacijama. Za razliku od navedenog slučaja, kod dvocijevnih tunela s istosmjernim prometom, moguće je da se i pored svih mjera opreza i sigurnosti dogodi da neko zaostalo vozilo iz druge cijevi, koja nije ugrožena požarom, prilikom napuštanja cijevi velikom brzinom naleti na putnika koji se evakuiira slobodnom cijevi do otvorenog prostora!

Po dolasku vatrogasne postrojbe na teren i utvrđivanju da je evakuacija završena, pristupit će se gašenju, a sustav ventilacije prelazi u režim kontroliranog odimljavanja, u smjeru koji odredi zapovjednik vatrogasne postrojbe na terenu. Određeni, odnosno odabrani smjer odimljavanja će odgovarati trenutno raspoloživom smjeru pristupa vatrogasaca požarištu. Dolazak vatrogasaca na mjesto požara bit će u najvećem dijelu puta izveden kroz servisno-evakuacijsku cijev, koja je slobodna od prometa i prilagođena potrebama evakuacije putnika i pristupa interventnih službi. Ulazak u požarom ugroženu cijev obaviti će se kroz poprečni prolaz najbliži mjestu požara.

5. SINTEZA OPERATIVNE STRATEGIJE SUSTAVA VENTILACIJE

5.1. Uvodne napomene

Sve do sada obavljene analize aerodinamičkih pojava vezanih za širenje dima, kao i uspostava i analiza tipičnih požarnih scenarija, te rasčlana požarnog incidenta u prepoznatljive, kauzalno povezane faze, imale su za cilj utvrditi opće zakonitosti u djelovanju sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara. To je bio preduvjet za definiranje jedinstvene operativne strategije upravljanja sustavom uzdužne ventilacije u uvjetima požarnog incidenta, kao temeljne postavke ovog rada.

Potrebno je napomenuti u ovoj fazi elaboracije, da uočene i detaljno opisane zakonitosti nisu specifične samo za djelovanje sustava uzdužne reverzibilne ventilacije, već se radi o pojavama koje su svojstvene aerodinamici tunela u uvjetima požara s jedne strane i faznoj povezanosti svih aktivnosti koje se izvršavaju tijekom požarnog incidenta, s druge strane. Tek na operativnoj razini, koja vodi računa o specifičnosti svakog od poznatih sustava ventilacije, dolazi do razlika u djelovanju promatranih sustava i sukladno tome preferiranju određenih aerodinamičkih pojava u pojedinim fazama požarnog incidenta (vidi Tablicu 4.). Ove razlike proizlaze iz poznatih specifičnosti i ograničenja³⁷ u radu različitih sustava ventilacije, te je stoga opću strategiju rada sustava ventilacije koja se ovdje izlaže nemoguće odijeliti od operativnog djelovanja promatranog tipa ventilacije. Možda je najbolja ilustracija spomenute nedjeljivosti i u verbalnoj sintagmi „operativne strategije“, o čemu je već bilo riječi u predgovoru.

Bez obzira na znanstvene postavke koje su ugrađene u predmetnu operativnu strategiju i kojima je gotovo u cijelosti posvećen dosadašnji dio rada, potrebno je napomenuti da je njihovo „uvezivanje“ u logičko konzistentnu i prepoznatljivu cjelinu stvar autorovog osobnog poimanja, formiranog na sveukupno stečenom znanju iz ovog područja. Stoga je predmetna sinteza operativne strategije jedna od mogućih interpretacija djelovanja sustava ventilacije u uvjetima požara, metodološki bazirana na kombinaciji opće prihvaćenih zakonitosti iz područja fenomenologije požara u tunelima i indukcije svih saznanja autora stečenih kroz dugogodišnji istraživački rad iz predmetnog područja.

³⁷ Npr. u fazi vatrogasne intervencije, kontrolirano odimljavanje kod uzdužne ventilacije je jedini mogući način odstranjivanja dima iz tunelske cijevi (osim kod izvedbe „serijske“ uzdužne ventilacije s oknima), dok sustavi poprečne i polu-poprečne ventilacije dim iz tunelske cijevi eliminiraju odsisom koji je najbliži mjestu pojave požara. Iz tog razloga je kod spomenutih sustava pojava stratifikacije poželjniji oblik raspodjele dima u uvjetima gašenja požara od kontroliranog odimljavanja.

5.2. Karakteristike operativne strategije

Pojam „strategije“ u tehničkoj terminologiji, neovisno od specifičnog područja primjene, imanentno u sebi sadrži slijedeće karakteristike, koje su po mišljenju autora važne za ovaj rad i moraju biti okosnica strateškog pristupa u postupku definiranja djelovanja nekog složenog tehničkog sustava, pa tako i sustava ventilacije:

- logička dosljednost,
- jednoznačnost;
- prepoznatljiva strukturiranost postupaka;
- konzistentnost postupaka, te
- opća primjenjivost.

Uz gore navedene opće karakteristike pojma „strategije“, potrebno ju je bilo dopuniti nizom specifičnosti koje će karakterizirati operativno, konkretno djelovanje sustava ventilacije u uvjetima požara. Shodno tome, neophodno je bilo u nju ugraditi specifične režime djelovanja, tj. rada ventilacijskog sustava, smjestiti ih u vremenski slijed prema ustanovljenim fazama požarnog incidenta, te u vezi s time definirati neka kritična vremena za pojedine operacije. Zatim, potrebno je bilo jasno razlučiti postupke koji se odnose na interaktivnu komunikaciju operater-sustav daljinskog vođenja (SDV), odnosno na verbalnu komunikaciju operater-zapovjednik vatrogasne postrojbe, u odnosu na postupke koje sustav upravljanja obavlja samostalno na temelju prethodno utvrđenih kriterija i mjernih podataka s točaka unutar tunela. Nadalje, sve je to bilo potrebno vezati za određenu geometriju tunela i pripadajuće „zoniranje“ objekta na požarne i vatrodojavne zone, na način da broj i duljina vatrodojavnih zona na objektu ne remeti opću primjenjivost postavljene strategije. Konačno, strategija je trebala sadržavati i informaciju o razmještanju i raspoloživosti vatrogasnih vozila, kao tehničko-organizacijskoj karakteristici tunela i istodobno uzeti u obzir moguće pravce pristupa vatrogasaca mjestu požara, što je operativna karakteristika, ovisna o danim uvjetima intervencije na terenu.

Već na prvi pogled jasno je da bi, zbog višeslojnosti opisanog strategijskog pristupa i potrebe da se u proces odlučivanja uključi niz različitih podataka, tekstualni prikaz operativne strategije bio veoma složen, nepregledan, a time i praktično neupotrebljiv.

Tražeci najpogodniji oblik prezentacije predmetne strategije, a poštujući gore navedene karakteristike, autor je djelovanje sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požara odlučio opisati tzv. **generičkim³⁸ algoritmima upravljanja**.

Ovdje se radi o najopćenitije strukturiranom obliku zapisa putem blok-dijagrama, kojim se definira djelovanje sustava uzdužne ventilacije u slučaju pojave bilo kojeg od mogućih scenarija požarnog incidenta u cestovnom tunelu. Pri tome je unutarnja struktura algoritma potpuno neovisna o raspoloživim pogonskim mogućnostima sustava uzdužne ventilacije i specifičnostima geometrije tunela. Iz spomenutih generičkih algoritama upravljanja moguće je izvesti specijalno prilagođene i razrađene posebne (konkretno) algoritme upravljanja, tj. modele upravljanja za svaki konkretni tunel. Ovdje je potrebno napomenuti da prelazak s generičkih na specijalno prilagođene (engl. "*customized*") algoritme upravljanja, temeljene na karakteristikama konkretnog tunela, ne traži bilo kakvu promjenu u strukturi pojedinih algoritama, već samo u njihovom broju i eventualno u detaljima vizualnog prikaza! Time je važni kriterij opće primjenjivosti i prepoznatljive strukturiranosti generičkog algoritma dosljedno poštovan u primjeni.

³⁸ *lat.* "gener-" + *franc.* "-ique", pridjev kojim se označava onaj pojam koji obuhvaća cijelu vrstu, rod, grupu ili klasu. U konkretnom slučaju: opći, univerzalni, opće primjenljiv, karakterističan za cijelu grupu.

5.3. Struktura generičkih algoritama upravljanja sustavom ventilacije

Skup generičkih algoritama upravljanja za hipotetski dvocijevni³⁹ tunel prikazan je u Prilogu 2. Namjera autora je bila da prikaz algoritama bude višeslojan, te da se algoritam u užem smislu, prikazan blok dijagramom upravljačkih aktivnosti, smjesti u vizualno okruženje koje daje i niz drugih korisnih informacija (npr. lokaciju požara u pojednostavljenom dispozicijskom prikazu tunela, vremenski slijed operacija-postupaka, organizacijsko-tehničke karakteristike vatrogasne službe i dr.). Mnoge od navedenih informacija su ključne za provođenje pojedinih segmenata algoritma i za smjer odvijanja procesa. Posebna pažnja posvećena je vizualnom oblikovanju ovako koncipiranog algoritma u širem smislu, što je omogućilo prepoznavanje stanovite „osne simetričnosti“ algoritma, kao i repetitivnosti njegovih pojedinih faza. Upravo su ova, netom spomenuta saznanja vezana za unutarnju strukturu algoritma, omogućila da se isti prevede s razine specifično prilagođenog algoritma na razinu generičkog algoritma upravljanja.

5.3.1. Unutarnja struktura generičkog algoritma

Analizom strukture upravljačkog algoritma u užem smislu (dijagram toka) vidljivo je da se on sastoji od upravljačkih akcija karakterističnih za:

- **ručno - daljinsko upravljanje** i
- **automatsko upravljanje određenim rutinskim sekvencijama** rada sustava ventilacije,

sukladno postavljenoj hipotezi rada i pripadajućem obrazloženju (Poglavlja 1.2. i 1.3.)

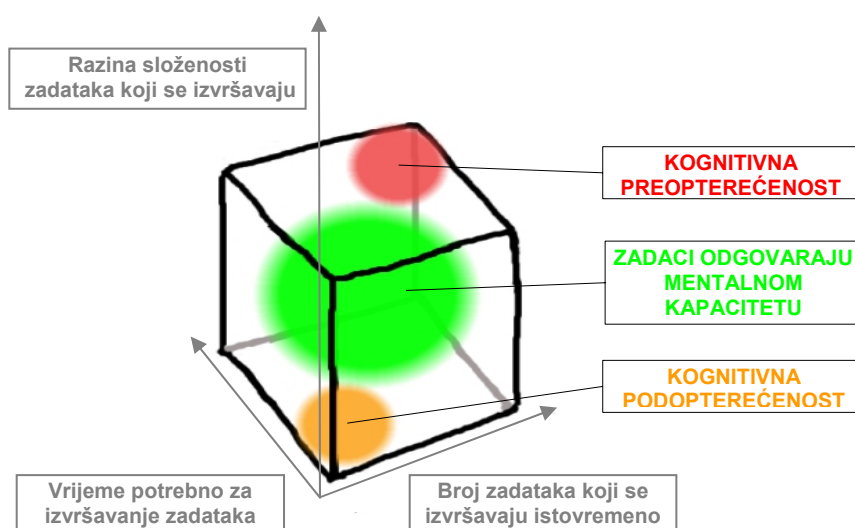
Ručno-daljinsko upravljanje sustavom rezultat je niza okolnosti i različitih informacija koje operater posjeduje u danom trenutku na temelju:

- a) objektivnih nedvosmislenih pokazatelja o sustavu i stanja na terenu, koje dobiva putem SCADA sustava i ostalih tehničkih servisa;
- b) komunikacije sa odgovornim osobama interventnih službi (vatrogasci, spasilačke ekipe, policija i dr.);
- c) osobne procjene temeljene na vrlo vjerojatnim ishodima pretpostavljenog stanja.

³⁹ Kao što je već dokazano kod generiranja tipičnih scenarija požarnog incidenta (Poglavlje 4.5.2.), jednocjevni tuneli s dvosmjernim prometom se mogu, na razini upravljanja, svesti na dvocijevni tunel u kojem se zbog izvanrednih okolnosti (održavanje, remont, rekonstrukcija) obavlja dvosmjerni promet.

Jedan od važnih ciljeva predmetne operativne strategije, koja je prikladno uređeni skup spomenutih generičkih algoritama upravljanja, je smanjiti intervenciju operatera na prihvatljivi minimum. Na taj način omogućeno je da se bitno smanji opterećenje operatera u kriznim situacijama, povećaju njegove kognitivne sposobnosti u procesu odlučivanja, uz istovremenu veću pouzdanost, brzinu i točnost upravljačke akcije. Odluke operatera (označene s ①, ②, ③ i ④ na grafičkom prikazu algoritma) označavaju ključna mjesta u algoritmu, tj. grananja na kojima se određuje dalji smjer upravljačke akcije i koje sustav upravljanja ne može prepoznati u automatskom radu. Broj mogućih intervencija operatera unutar jednog algoritma (koji opisuje jedan požarni scenarij) iznosi maksimalno dvije intervencije, što mogućnost greške u odlučivanju smanjuje na minimum! Nadalje, spomenute odluke operatera, u pravilu pokreću niz unaprijed propisanih procedura i programa, čime se ostvaruje poželjno grupiranje komandi.

Sve dosad izneseno i provedeno u generičkim algoritmima upravljanja, u potpunom je suglasju s najnovijim preporukama EU projekta UPTUN [76], dio 3 (original: „*Human Response*“), koje između ostalog imaju za cilj spriječiti moguća kognitivna opterećenja operatera, te potaknuti razvoj suvremenih metoda⁴⁰ podrške u odlučivanju operatera u kriznim situacijama.



Slika 32. Shematski prikaz kognitivnog modela opterećenja operatera [76]

⁴⁰ engl. „**D**ecision **S**upport **M**odels“, DSM

Automatsko upravljanje određenim rutinskim sekvencijama rada ventilacijskog sustava odnosi se u cijelosti na kontrolu uzdužnog strujanja zraka (dima), koja se svodi na dva podprograma za slučaj požarnog akcidenta i jednog podprograma za slučaj redovnog pogona. Svi su sadržani u jedinstvenoj programskoj podršci, koju autor s multidisciplinarnim istraživačkim timom razvija u *Brodarskom institutu* u Zagrebu.

Iako ovaj potonji podprogram, predviđen za smirivanje zračne struje u određenim situacijama redovnog pogona, na prvi pogled nije u izravnoj vezi s problematikom rada, niti je eksplicitno prikazan u algoritmima, u uskoj je vezi s djelovanjem sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara i nije ga moguće zaobići u elaboraciji predmetne operativne strategije i pripadajućih generičkih algoritama.

Prema tome, kontrola uzdužnog strujanja zraka (dima) provodi se kroz tri različita moda rada sustava ventilacije (opisana podprogramima 1, 2 i 3), koji osiguravaju zahtjev kontrole uzdužnog strujanja za tri različita slučaja s obzirom na brzinu reakcije, smjer strujanja i tražene intervale (granice) brzine strujanja.

Radi se o sljedećim modovima automatskog rada sustava ventilacije za slučaj:

➤ **Požarnog akcidenta:**

PODPROGRAM 1: smirivanje (stabilizacija) uzdužnog strujanja zraka u uvjetima požara.

PODPROGRAM 2: odimljavanje tunela nakon smirivanja (stabilizacije) zračne struje i potvrđenog završetka evakuacije putnika.

➤ **Redovnog pogona**

PODPROGRAM 3: redukcija brzine zračne struje u uvjetima redovnog pogona.

Detaljni opis predmetnih podprograma i njihove unutarnje strukture i djelovanja slijedi na narednim stranicama.

PODPROGRAM 1: smirivanje (stabilizacija) uzdužnog strujanja zraka u uvjetima požara.

Oznaka u algoritmu:



Odluka operatera: ❶

Karakteristike: U uvjetima nastanka požara i potvrde alarma, jedna od raspoloživih alternativa je pokretanje algoritma stabilizacije (umirivanja) zračne struje sa sljedećim zahtjevima kontrole zračne struje:

- brza stabilizacija zračne struje s brzinom struje u tipičnim granicama od 1,0 do 1,5 m/s;
- željeni smjer zračne struje je zatečeni smjer strujanja, reverzija smjera je zabranjena!
- svi ventilatori u vatrodojavnoj zoni prorade alarma ostaju izvan pogona tijekom požarnog incidenta;
- u početku rada algoritma nikakva se upravljačka akcija ne smije poduzeti dok je brzina strujanja manja od tipično 1,5 m/s.

Navedeni Podprogram 1 ima za svaku vatrodojavnu zonu i ($i = 1 \div n$) po četiri upravljačka postupka, tj. za svaku cijev po dva kako slijedi:

- B(i).- 1.** desna cijev, zatečeni smjer strujanja S → J
- B(i).- 2.** desna cijev, zatečeni smjer strujanja S ← J
- B(i).- 3.** lijeva cijev, zatečeni smjer strujanja S → J
- B(i).- 4.** lijeva cijev, zatečeni smjer strujanja S ← J

Svaki od nabrojanih upravljačkih postupaka, uzima u obzir lokaciju pojedine vatrodojavne zone (i) u kojoj se dogodio požar i s obzirom na nju, pomoću unaprijed određene matrice težinskih faktora rasporeda ventilatora uključuje pojedine ventilatore u reverzibilnom smjeru (u odnosu na zatečeni smjer strujanja na početku upravljačkog postupka).

Najveći težinski faktor (tzv. „ponder“), ima ventilator (ili ventilatorska baterija) najudaljenija od mjesta požara. Time se osigurava da lokalni utjecaj ventilatora na sliku strujanja bude minimalan (vidi Foto 9), a da efekt usporjenja zračne struje bude maksimalan i uravnotežen po cjelokupnoj površini poprečnog presjeka. Očigledno je da povećani broj vatrodojavnih zona, kao i broj pripadajućih ventilatora omogućuje finije upravljanje, s većom „rezolucijom“ upravljačke akcije, međutim čini postupak upravljanja donekle složenijim.

Realizacija Podprograma 1 u praksi je vrlo zahtjevna, jer umirivanje zračne mase u gibanju, u relativno kratkom vremenu, uz izbjegavanje promjene postojećeg smjera strujanja, predstavlja složeni regulacijski problem koji se različito očituje kod kratkih i dugih tunela:

- **kratki tuneli:** masa zraka u gibanju, koju treba umiriti je očigledno manja nego kod dugačkih tunela, međutim istovremeno je broj ventilatora kod spomenutih tunela manji. Time je „rezolucija“ postupka upravljanja niska, a doprinos ventilatora upravljačkoj akciji vrlo često prevelik, što može dovesti do reverzije, tj. promjene smjera strujanja zračne mase, odnosno do pojave nestabilnih uvjeta regulacije. Nadalje, kod kratkih tunela je utjecaj vanjskih, meteoroloških faktora vrlo velik, što proces upravljanja dodatno čini složenijim.
- **dugi tuneli:** masa zraka kod ove vrste tunela je vrlo velika i neophodno je raspolagati sa moćnom porivnom silom sustava ventilacije, da bi se efikasno upravljalo njenim gibanjem. Npr. za slučaj tunela Mala Kapela ($L=5.760$ m), ukupna masa zraka u gibanju je oko 380.000 kg, a kinetička energija takvog sustava pri brzini strujanja zraka od 6 m/s iznosi 6,84 MJ! Ipak, prednost kontrole uzdužnog strujanja kod ovih sustava je veliki broj ventilatorskih baterija i konzekventno tome fina „rezolucija“ upravljačke akcije, kao i smanjena osjetljivost ovih sustava na promjene meteoroloških parametra, zbog znatne inercije velike zračne mase u gibanju. Međutim, ukoliko je meteorološki utjecaj (npr. vjetar) dominantan i uz to trajnijeg karaktera, zračna masa u gibanju će se prilagoditi novonastaloj situaciji, tj. poprimiti smjer gibanja sukladno uspostavljenoj razlici tlakova na portalima.

Zaključak

Kao zaključak ove kratke analize o uvjetima regulacije uzdužnog strujanja zraka u ovisnosti o dužini tunela, može se reći da su dugi tuneli u smislu regulacije povoljniji od kratkih tunela, tj. omogućuju stabilnije upravljanje, sa finijom „rezolucijom“, uz manju ovisnost na promjene vanjskih meteoroloških parametara, premda su ventilatori i prateći senzori s kojima to postižu znatno brojniji i skuplji. Ključna dilema koje se nameće u vezi s ovom problematikom je određivanje granice koja u regulacijskom smislu predstavlja prijelaz sa kratkih na duge tunele. Mišljenje autora, temeljeno na određenom broju numeričkih simulacija regulacijskog procesa za različite dužine tunela, obavljenih u *Brodarskom institutu*, je da se donja granica prihvatljivosti primjene Podprograma 1 nalazi u intervalu dužina od **1.000 ÷ 1.500 m** (ovisno o karakterističnim pogonskim detaljima konkretnog tunela)! Autor smatra da primjena ovakvo koncipiranog podprograma nema realno tehničko opravdanje ispod granične vrijednosti od **1.000 m**, dok se za dužine iznad **1.500 m** može sa velikom dozom sigurnosti tvrditi da su prihvatljive za praktičnu primjenu analiziranog podprograma.

Detalji provedbe Podprograma 1, koji uključuju opis matematičkog i upravljačkog modela bit će prikazani u Poglavlju 6.1. i 6.2.

PODPROGRAM 2: odimljavanje tunela nakon stabilizacije (umirivanja) zračne struje i potvrde završetka evakuacije putnika.

Oznaka u algoritmu:



Odluke operatera: ❷ ili ❸ ili ❹

Karakteristike: Nakon završetka rada Podprograma 1, a nakon potvrde da je evakuacija putnika na terenu završena, moguće je pokrenuti algoritam kontroliranog odimljavanja tunela sa sljedećim zahtjevima kontrole zračne struje:

- postizanje brzine zračne struje u tipičnim granicama od 3,0 do max. 5,0 m/s
- željeni smjer zračne struje određuje zapovjednik vatrogasne brigade, sukladno raspoloživim mogućnostima pristupa požaru na terenu.

Prebacivanje iz Podprograma 1 (faza stabilizacije zračne struje) u Podprogram 2 (faza kontroliranog odimljavanja tunela) je u nadležnosti operatera, uz prethodnu potvrdu zapovjednika vatrogasne brigade o okončanju evakuacije putnika i smjeru pristupa požaru.

Potrebno je napomenuti da je pokretanje Podprograma 2 moguće i neovisno o Podprogramu 1 i gore navedenoj proceduri, ukoliko se u požarom ugroženoj cijevi odvija tekući promet, bez pojave druge nesreće ili požara nizstrujno od postojećeg. U tom slučaju se predviđa startanje Podprograma 2 odlukom operatera, odmah po automatskoj obustavi rada sustava ventilacije.

Podprogram 2 ima četiri moguće varijante rada, u ovisnosti od kombinacije zatečenog stanja i postavne vrijednosti smjera odimljavanja. U tom smislu razlikujemo slijedeće kombinacije:

Desna cijev (smjer odvijanja prometa S → J):

- C(i).1.** zatečeni smjer strujanja S → J; postavna vrijednost smjera S ← J
- C(i).2.** zatečeni smjer strujanja S ← J; postavna vrijednost smjera S ← J
- C(i).1.- 1.** zatečeni smjer strujanja S → J; postavna vrijednost smjera S → J
- C(i).1.- 2.** zatečeni smjer strujanja S ← J; postavna vrijednost smjera S → J

Lijeva cijev (smjer odvijanja prometa $S \leftarrow J$):

- C(i).1.** zatečeni smjer strujanja $S \rightarrow J$; postavna vrijednost smjera $S \rightarrow J$
- C(i).2.** zatečeni smjer strujanja $S \leftarrow J$; postavna vrijednost smjera $S \rightarrow J$
- C(i).1.- 1.** zatečeni smjer strujanja $S \rightarrow J$; postavna vrijednost smjera $S \leftarrow J$
- C(i).1.- 2.** zatečeni smjer strujanja $S \leftarrow J$; postavna vrijednost smjera $S \leftarrow J$

Svaka vatrodajavna zona i ($i = 1 \div n$) ima svoje odgovarajuće varijante rada Podprograma 2, koje se razlikuju samo u primjeni težinskih faktora rasporeda ventilatora predviđenih za rad, dok je struktura algoritma ista.

Važno je naglasiti da je cilj Podprograma 2 postizanje kritične brzine strujanja zraka (dima) u željenom smjeru odimljavanja. Pri tome je interval dopuštenih brzina definiran u relativno širokom intervalu od 3,0 do 5,0 m/s. Postizanje kritične brzine na donjoj granici intervala ($u_c \approx 3,0$ m/s) omogućuje uspješno odimljavanje požara od 50 MW, dok bi postizanje kritične brzine na gornjoj granici intervala ($u_c \approx 5,0$ m/s) omogućilo uspješno odimljavanje požara znatno preko 100 MW! Dalje povećanje kritične brzine nije ekonomično za rad sustava ventilacije niti ima pokriće u realno provedivoj vatrogasnoj intervenciji za slučaj pojave takvih katastrofalnih požara! Također, daljnje povećanje brzine odimljavanja iznad 5,0 m/s nije preporučljivo i zbog specifičnosti rada s pjenom, kao mogućim sredstvom gašenja. Naime, kod brzina uzdužnog strujanja većih od 5,0 m/s, dolazi do nošenja pjene sa strujom zraka, a time i do ometanja vatrogasne intervencije. Autor je mišljenja da je navedenu gornju vrijednost brzine odimljavanja potrebno pažljivo proanalizirati i definitivno utvrditi nakon provedbe predstojećih požarnih testova.

- (!) Kontrolu uzdužnog strujanja zraka potrebno je obaviti i u „režimu odimljavanja“, usprkos uobičajenoj praksi da se odimljavanje vrši sa svim raspoloživim ventilatorima, a to znači i sa maksimalno mogućom uzdužnom brzinom! Ograničenje gornje vrijednosti uzdužne brzine, potrebno je zbog osiguranja optimalnih uvjeta za vatrogasnu intervenciju prilikom gašenja pjenom, kao i zbog razumnog korištenja elektroenergetskih resursa, koji će u slučaju požara svakako biti ograničeni i/ili djelomično uništeni.

PODPROGRAM 3: redukcija brzine zračne struje u uvjetima redovnog pogona. Ovaj podprogram nije neposredan predmet interesa u radu jer ne djeluje u uvjetima požara, te stoga nije ni prikazan kao dio generičkih algoritama. Međutim, isti se navodi obzirom da s Podprogramima 1 i 2 čini funkcionalnu cjelinu.

Karakteristike: U uvjetima redovnog pogona traži se redukcija brzine uzdužnog strujanja sa sljedećim zahtjevima:

- redukcija brzine zračne struje u granicama tipično od 2,0 do 3,0⁴¹ m/s;
- željeni smjer zračne struje je zatečeni smjer strujanja zraka, reverziju smjera valja izbjegavati;
- kritična je tražena neosjetljivost na prolazne poremećaje, tj. fluktuacije brzine uzdužnog strujanja uslijed prometovanja (teških) vozila.

Stabilizacija zračne struje u uvjetima redovnog pogona se provodi po potrebi, ukoliko je promet većeg intenziteta ili se takav očekuje (sezonsko povećanje prometa), te ukoliko je najavljen prolazak vozila s opasnim tvarima. Time se ostvaruju preduvjeti da se u slučaju požara u što kraćem roku obavi brza stabilizacija (umirivanje) zračne struje aktiviranjem Podprograma 1. Analiza procesa umirivanja zračne struje, ovisno o različitim početnim brzinama zraka obraditi će se u Poglavlju 6.3.

Svi navedeni podprogrami (1, 2 i 3) s pripadajućim algoritmima rade u petlji s konstantnim vremenom ciklusa izvođenja. Podprogrami su stalno aktivni, te zavisno od odabranog moda rada izvršavaju kontrolu strujanja zraka za jedan od tri navedena slučaja ili izvršavaju obradu ulaznih varijabli odnosno pripremu varijabli za algoritme kontrole strujanja zraka, bez izvršavanja ikakvih upravljačkih akcija.

⁴¹ Gornja vrijednost intervala brzine za slučaj PODPROGRAMA 3 određuje se, odnosno potvrđuje neposredno prije unosa podataka u izvršni SCADA kod, ovisno o uvjetima prometovanja u konkretnom tunelu.

5.3.2. Vizualno okruženje generičkog algoritma

Dijagram toka, kojim je opisan proces upravljanja sustavom ventilacije, predstavlja središnji dio generičkog algoritma, kako po značaju, tako i po smještaju unutar vizualnog okruženja algoritma u cjelini. Navedeno vizualno okruženja daje dvije dopunske grupe informacija, koje nisu u izravnoj funkcionalnoj vezi s procesom upravljanja, ali ga u velikoj mjeri određuju. Radi se o:

- a) vremenskom slijedu upravljačkih aktivnosti u korelaciji s fazama požara;
- b) dispoziciji tunela s prikazom vatrodojavnih zona i smještajem vatrogasnih postrojbi.

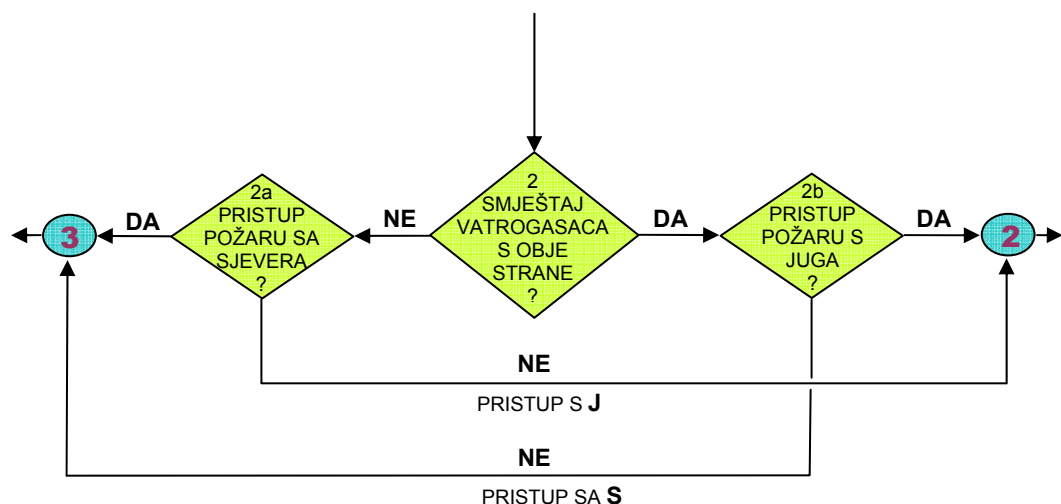
a) vremenski slijed upravljačkih aktivnosti u korelaciji s fazama požara dijeli cjelokupni proces upravljanja na grupe upravljačkih aktivnosti koje su karakteristične za određene faze požara, te određuje prihvatljiva vremena za njihovu realizaciju, tj. izvršavanje. Autor se prilikom spomenute vremenske segmentacije procesa upravljanja dvoumio u potrebitost eksplicitnog navođenja prihvatljivih maksimalnih vremena realizacije, želeći generičke algoritme učiniti što općenitijim i univerzalno prihvatljivim. Međutim, analiza požarnog opterećenja provedena u Poglavlju 4.4.3. i pripadajuća eksponencijalna vremenska funkcija rasta toplinske snage požara (HRR) prikazana na Slici 25. učvrstila je autorovo uvjerenja da generički algoritam upravljanja ipak treba biti smješten na realnu vremensku skalu. Naime, samo u slučaju da prikazane upravljačke aktivnosti budu izvršene sukladno definiranim vremenskim intervalima, predmetni generički algoritmi, a time i cjelokupna strategija upravljanja koja se njima opisuje, postižu svoju punu operativnu vrijednost. Uostalom, borba s požarom je uvijek ujedno i borba s vremenom!

Tablica 11. Maksimalna vremena realizacije aktivnosti karakterističnih za pojedine faze požara

FAZA POŽARA	POČETNA AKTIVNOSTI	MAX. VRIJEME REALIZACIJE (mm:ss)	Napomena
I FAZA	Zapaljenje	00:00	-
II + III FAZA	Aktiviranje alarma	02:30	Prema RVS 9.282
IV FAZA	Pristupanje gašenju	08:00	Potvrditi analizom rizika!
NORMALIZACIJA	Kraj gašenja	-	Po potrebi

b) dispozicija tunela s prikazom vatrodajavnih zona i smještajem vatrogasnih postrojbi omogućuje da se struktura dijagrama toka dodatno prilagodi navedenim informacijama. Vidljivo je da dijagram toka (Prilog 2) ima zajednički dio, koji predstavlja „os“ dijagrama, neovisan o geometrijskim karakteristikama tunela i smještaju vatrogasnih postrojbi, a da se „grananje“ dijagrama u osno simetričnu strukturu s lijevom i desnom granom toka, obavlja u ovisnosti o:

- smještaju vatrogasne postrojbe, kao pred-definiranoj organizacijsko-tehničkoj mjeri, karakterističnoj za određeni tunel
- i
- mogućem smjeru pristupa vatrogasaca požaru, kao trenutnoj, pogonskoj karakteristici, ovisnoj o uvjetima na terenu, koji su podložni promjenama i specifični za svaki požarni incident.



Slika 33. Grananje dijagrama toka u „osno simetričnu“ strukturu

Prikaz (markiranje) vatrodajavne zone na pojednostavljenoj dispoziciji tunela, u kojoj je došlo do pojave alarma, omogućava prilagođavanje generičkog algoritma konkretnim uvjetima evakuacije i vatrogasne intervencije za promatranu zonu, kao i kvalitetniju vizualizaciju procesa odimljavanja u ovisnosti od aerodinamičkih parametara koji ga određuju (zatečeni smjer strujanja zraka i željeni smjer odimljavanja).

Potrebno je napomenuti da broj vatrodajavnih zona treba odrediti prvenstveno sukladno tehničkim preporukama za optimalno funkcioniranje odabranog sustava vatrodajave, ali također ga treba prilagoditi geometrijskim karakteristikama tunela (npr. poprečnim prolazima kao mogućim granicama zona) i dispoziciji ventilatorskih baterija (npr. ujednačiti broj ventilatora u zoni, te izbjegavati da ventilatorska baterija bude na samoj granici zone!). Također, poželjno je da broj vatrodajavnih zona u jednoj tunelskoj cijevi bude paran, s ujednačenim⁴² dužinama, jer se time pojednostavljuje broj i struktura upravljačkih algoritama koji se dobivaju prilagođavanjem generičkih algoritama konkretnim pogonskim uvjetima promatranog tunela.

U Prilogu 2, koji prikazuje skup generičkih algoritama upravljanja za hipotetski dvocijevni tunel, broj vatrodajavnih zona u tunelskim cijevima odabran je zbog ilustracije kao neparni broj (3 zone/cijevi). Zbog takvog izbora, algoritam upravljanja ventilacijom za slučaj pojave požara u središnjim vatrodajavnim zonama (br. 2 i br. 5) je očigledno složeniji i teži za praktičnu provedbu.

⁴² Raspored vatrodajavnih zona treba biti obavljen na način da sadrži stanoviti red, ujednačenost i geometrijsku sličnost. To ne znači nužno da sve vatrodajavne zone moraju biti jednake duljine!

6. AUTOMATSKE SEKVENCIJE RADA VENTILACIJSKOG SUSTAVA

6.1. Uvodne napomene

Održivost predmetne operativne strategije uvelike ovisi o provedivosti i praktičnoj primjenjivosti automatskih sekvencija rada (podprograma) ventilacijskog sustava, koje su okosnica ove strategije, a već su opisane u Poglavlju 5.3.1. U spomenutom poglavlju definiran je položaj navedenih Podprograma unutar dijagrama toka, njihova veza s ostalim upravljačkim akcijama i položaj na vremenskoj skali požarnih faza. Također su opisane njihove temeljne značajke i unutarnja struktura, te iznesene stanovite dileme koje su pratile autora tijekom njihovog koncipiranja. Nadalje, u tekstu će biti prikazani matematički i regulacijski modeli na kojima se temelji praktična realizacija ovih podprograma, kao sastavnih dijelova cjelovite programske podrške za kontrolu uzdužnog strujanja zraka u cestovnom tunelu. Tom prilikom autor nema namjeru navoditi i obrazlagati tzv. „izvršne algoritme“ koji su predviđeni za implementaciju u SCADA⁴³ sustav tunela, i na temelju kojih će sustav raditi u realnim uvjetima eksploatacije. Stoga predmet interesa i dalje ostaje znanstvena elaboracije predmetne strategije na razine opće primjene.

6.2. Definiranje matematičkog modela strujanja zraka u tunelu

6.2.1. Temeljne pretpostavke

U tekstu će biti opisan pojednostavljeni matematički model strujanja zraka u tunelu, koji je implicitno sadržan u upravljačkim algoritmima prethodno obrazložene programske podrške za kontrolu uzdužnog strujanja. Predmetni matematički model oslanja se na klasične aerodinamičke zakonitosti svojstvene za zrak, kao promatrani fluid, odnosno za homogenu mješavinu zraka i dima na dovoljnoj udaljenosti od mjesta požara. U neposrednoj blizini požara nije moguće bez znatnih ograničenja primijeniti klasične zakonitosti mehanike fluida, te se mjesto požara smatra izvjesnim diskontinuitetom u pogledu njihove primjene. No, ova činjenica nema bitno ograničavajući utjecaj na primjenu matematičkog i njemu pripadnog regulacijskog modela u procesu upravljanja zračne struje u tunelu za slučaj požara. Razlog tome je što sustav upravljanja sve bitne informacije za svoje upravljačke akcije dobiva iz zona koje nisu pod neposrednim utjecajem požara, iako su fizikalni parametri tih zona pod utjecajem požara promijenjeni.

⁴³ engl. Supervisory Control And Data Acquisition

Temeljne postavke, koje su „a priori“ ugrađene u predmetni matematički model strujanja zraka u tunelu odnose se na slijedeće:

- a) zrak unutar tunelske cijevi, koji je predmet interesa u analizama aerodinamičkih pojava se može smatrati idealnim plinom, čije promjene stanja se odvijaju sukladno jednadžbi stanja idealnog plina:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (9)$$

- b) zrak se u promatranim intervalima brzina ponaša kao nestlačiv fluid:

$$\text{Machova značajka struje } M \ll 1, \text{ tj. } \Delta\rho \ll \rho_m,$$

gdje je $\Delta\rho$ najveće odstupanje gustoće od prosječne gustoće zraka u tunelu (ρ_m).

Ovako definirana nestlačivost ne podrazumijeva konstantnu gustoću zračnog medija unutar tunelske cijevi!

- c) strujanje zraka u tunelu se razmatra kao jedno-dimenzionalno, uzdužno strujanje paralelno s osi tunelske cijevi. Lateralna i vertikalna komponenta brzine mogu se zanemariti [77].
- d) strujanje zraka unutar tunela je izrazito turbulentnog karaktera zbog zajedničkih utjecaja velikih vrijednosti *Reynoldsovog broja* (reda veličine 10^6 [77]) i učinka prometovanja vozila.
- e) uzdužna brzina strujanja zraka (po osi x), zbog efekata navedenih ad d) ima različite vrijednosti na određenom poprečnom presjeku tunela (u). Vrijednosti uzdužnih brzina koje se koriste u matematičkom modelu predstavljaju srednju brzinu (u_z) u promatranom poprečnom presjeku tunela, prema izrazu:

$$u_z = \frac{1}{A} \int_A u \cdot dA \quad (10)$$

- f) strujanje u tunelu se može promatrati kao kvazi-stacionarno strujanje, obzirom da su promjene uzdužne brzine zraka u dužem vremenskom periodu vrlo spore zbog velike inercije zračne mase u gibanju. Ova pretpostavka će se posebno manifestirati u Poglavlju 6.3., prilikom verifikacije regulacijskog modela i određivanja mrtvog vremena regulacijskog sustava.

6.2.2. Osnovne fizikalne zakonitosti procesa strujanja

Osnovni fizikalni zakoni i pripadajuće jednačbe, kojima je određeno gibanje zraka u cestovnom tunelu, izraženi su kroz:

- zakon očuvanja mase (jednačba kontinuiteta);
- zakon očuvanja količine gibanja (inercije);
- zakon očuvanja energije (1. glavni stavak termodinamike);
- jednačbu stanja idealnog plina.

Za praktičnu primjenu korištenja u matematičkom modelu odabran je zakon očuvanja količine gibanja, koji uz određene modifikacije daje jednačbu dinamičke ravnoteže aksijalnih sila koje djeluju na promatrani kontrolni volumen, segment tunela ili u najopćenitijem obliku na cjelokupni volumen zraka u tunelu.

6.2.3. Osnovni matematički model strujanja

Osnovni matematički model strujanja, prikazan općom jednačbom dinamičke ravnoteže aksijalnih sila, glasi [77]:

$$F_A = \sum_0^L F_V + \sum_0^L F_{JF} - \sum_0^L F_F + \sum_0^L F_P - \sum_0^L F_G + \Delta F_E \quad (11)$$

pri čemu je:

F_A sila potrebna za ubrzanje cjelokupne zračne mase prilikom gibanja uzduž tunela;

$\sum_0^L F_V$ ukupna sila nastala promjenom količine gibanja ubačenog i odsisanog zraka unutar tunelske cijevi (nije karakteristično za uzdužnu ventilaciju!);

$\sum_0^L F_{JF}$ ukupna porivna sila svih aksijalnih ventilatora, radi se o jedinoj upravljajućoj sili kojom se obavlja kontrola uzdužnog strujanja (!);

$\sum_0^L F_F$ ukupna sila otpora strujanja, koja uključuje silu *Darcyjevog* trenja i sve lokalne otpore strujanja duž tunelske cijevi;

$\sum_0^L F_P$ ukupna sila interakcije vozila s okolnim zrakom, poznata kao „efekt klipa“;

$\sum_0^L F_G$ ukupna uzdužna komponenta gravitacijske sile (težine) zračne mase u slučaju nagiba tunela s kutom α (uzima se komponenta $\sin \alpha$);

ΔF_E razlika sila nastalih interakcijom zračne mase u tunelu s okolinom, tj. djelovanjem vanjskih parametara (razlike barometarskih tlakova na portalima, utjecajem vjetra, utjecajem temperature posredstvom efekta dimnjaka, ulazno/izlaznim gubicima, eventualnom dinamičkom konverzijom tlakova na portalima).

Gore navedena opća jednadžba može se za slučaj uzdužne ventilacije bez lokalnog ubacivanja ili odsisa zraka⁴⁴, s malim nagibom kolnika ($\sin \alpha \approx 0$), pojednostaviti u oblik:

$$F_A = \sum_0^L F_{JF} - \sum_0^L F_F + \sum_0^L F_P + \Delta F_E \quad (12)$$

Nadalje, s obzirom da se s dovoljnom točnošću može tvrditi da je poprečni presjek tunela konstantan po cijeloj dužini tunela, gornji izraz (12) se zbog praktičnosti računa u domeni tlakova ($p = F/A$), tj. svaki faktor unosi diferenciju tlaka u jednadžbu (dimenzija pojedinih sumanada je u [Pa]).

6.2.3.1. Varijable sustava

u – uzdužna brzina strujanja u promatranom segmentu tunela [m/s]

t – vrijeme [s]

ρ – gustoća zraka [kg/m^3]

l_s – duljina segmenta, $l_s = 0 \div L$ [m]

A – poprečni presjek segmenta tunela [m^2]

Tablica 12. Ovisnost gustoće zraka o temperaturi

T [°C]	ρ [kg/m^3]
-20	1,365
0	1,252
10	1,206
20	1,164
30	1,127

⁴⁴ odnosi se na sustave kao što su npr. serijska uzdužna ventilacija ili sustav ventilacije sa *Saccardo* mlaznicama.

6.2.3.2. Obrazloženje sumanada ravnoteže aksijalnih sila**a) Inercijska sila F_A (masa * akceleracija)**

Modifikacijom poznatog *Newtonovog* izraza $F = m \cdot a$, dobije se:

$$F_A / A = \rho l_s \cdot \frac{du}{dt} \quad (13)$$

b) Sila uslijed razlike momenata $\sum_0^L F_V$ (dodatni protok!)

Navedena sila uvjetuje razliku u količini gibanja ubačenog i odsisanog zraka iz tunela. Također se javlja prilikom modeliranja procesa strujanja po segmentima tunela, kada postoje razlike u protocima zraka unutar pojedinih segmenata. U konkretno slučaju modeliranja uzdužne ventilacije nije od interesa!

c) Porivna (upravljачka) sila ventilatora $\sum_0^L F_{JF}$

Za pojedinačni ventilator vrijedi izraz:

$$F_{JF} / A = C \frac{F_N}{A} \left(1 - \frac{u}{v_N} \right) \quad (14)$$

pri čemu je:

C ... instalacijski faktor, ovisan o mjestu ugradnje ventilatora, njihovom međusobnom položaju i geometriji tunela ($C = C_1 * C_2 * C_3$)

F_N ... nazivna porivna sila ventilatora [N]

v_N ... nazivna (stacionarna) brzina struje zraka iz ventilatora (s predznakom!) [m/s]

Za sve ventilatore pojednostavljeni izraz ukupne porivne sile bi glasio:

$$\frac{1}{A} \sum_0^L F_{JF} = C \frac{F_N}{A} \left(N_{v+} \left(1 - \frac{u}{|v_N|} \right) - N_{v-} \left(1 + \frac{u}{|v_N|} \right) \right) \quad (15)$$

U ovoj formuli se uzdužna brzina u uzima s predznakom, dok su brojevi ventilatora koji rade u smjeru, odnosno suprotno od uspostavljenog smjera uzdužne brzine N_{v+} , $N_{v-} > 0$.

d) Ukupna sila otpora strujanja $\sum_0^L F_F$ (interni gubitak tlaka)

Navedena ukupna sila otpora strujanja uključuje silu površinskog trenja i lokalne otpore (proširenja-suženja, rasvjetu, signalizaciju, ventilatore, informacijske panele i dr.), a njen razrađeni oblik glasi:

$$\frac{1}{A} \sum_0^L F_F = -\frac{\rho}{2} \lambda_f \frac{l_s}{D} u|u| - \frac{\rho}{2} \sum_{k=1}^L \zeta_k u|u| \quad (16)$$

pri čemu je:

D ... hidraulički promjer segmenta tunela [m]

(računa se kao $4 A/O$, gdje je O opseg poprečnog presjeka segmenta [m])

λ_f ... Darcyjev koeficijent trenja (prema podacima iz literature [77] obično iznosi 0,015 za vrlo glatke sekundarne obloge do 0,05 za prodore u stijeni, bez sekundarne obloge).

Međutim, prilikom terenskog određivanja otpora strujanja u pojedinim tunelima mjerenjem deceleracijskih krivulja, javlja se problem nemogućnosti razlučivanja otpora površinskog trenja i lokalnih otpora strujanja. Stoga se, zbog potrebe daljnje numeričke obrade izraza (16), obavlja pojednostavljenje izraza uvođenjem ukupnog koeficijenta otpora:

$$\lambda = \lambda_f + \frac{D}{l_s} \sum_{k=1}^L \zeta_k \quad (17)$$

tako da konačni oblik izraza (16), za cjelokupnu duljinu tunela sada glasi:

$$\frac{1}{A} \sum_0^L F_F = -\frac{\rho}{2} \lambda \frac{L}{D} u|u| \quad (18)$$

Terenska mjerenja deceleracijskih krivulja, koje je obavio *Brodarski institut* na tunelima *Mala Kapela* [78], *Brinje* [79] i *Plasina* [80], s ciljem određivanja ukupnog koeficijenta otpora strujanja u tunelu, daju uglavnom vrlo povoljne vrijednosti $\lambda = 0,020 - 0,025$. Radi se o tunelima s betonskom sekundarnom oblogom izrađenom s kliznom oplatom.

e) ukupna sila interakcije vozila s okolnim zrakom $\sum_0^L F_P$ („efekt klipa“)

Sliku strujanja u tunelima dodatno čini složenijom interakcija vozila u gibanju sa zračnom masom tunela. Pri tome vozila mogu imati pozitivni doprinos (istosmjerni promet) ili negativni doprinos (dvosmjerni promet) u ukupnom, rezultatnom strujanju.

$$\frac{1}{A} \sum_0^L F_P = \frac{\rho}{2} \frac{i_F}{\left(1 - \frac{A_F}{A}\right)^2} \frac{A_F}{A} \left(N^+(u_{t+} - u) |u_{t+} - u| + N^-(u_{t-} - u) |u_{t-} - u| \right) \quad (19)$$

Pojednostavljena formula glasi:

$$\frac{1}{A} \sum_0^L F_P = \frac{\rho}{2} \frac{i_F A_F}{A} \left(N^+(u_{t+} - u) |u_{t+} - u| + N^-(u_{t-} - u) |u_{t-} - u| \right) \quad (20)$$

pri čemu je:

N^+ , N^- ... broj vozila u segmentu tunela, koja putuju u “+” i “-” smjeru

u_{t+} , u_{t-} ... brzina vozila unutar tunela u “+” i “-” smjeru [m/s]

A_F ... poprečni presjek vozila [m²]

i_F ... faktor forme, različit za osobna vozila, te za kamione i autobuse, ekvivalentni poprečni presjek vozila za računanje otpora je: $i_F \cdot A_F$

Kod jednosmjernih tunela željeni smjer strujanja zraka je u smjeru kretanja vozila i za normalnog rada doprinos prometa je pozitivan ($N^- = 0$; u_{t+} , $u > 0$; $u_{t+} > u$).

Kod dvosmjernih tunela za najnepovoljniji slučaj pretpostavlja se gušći promet u smjeru suprotnom od smjera ventilacije.

f) ukupna uzdužna komponenta gravitacijske sile $\sum_0^L F_G$ zračne mase

$$\frac{1}{A} \sum_0^L F_G = g \cdot \rho \cdot \sin \alpha \quad (21)$$

Navedena komponenta sile javlja se samo u slučaju kada kolnik tunela ima znatniji nagib. U konkretnom slučaju, kod uobičajeno projektiranih nagiba (niveleta) kolnika do 5%, ovaj faktor se može zanemariti, obzirom da je $\sin \alpha \approx 0$.

g) utjecaj vanjskih sila ΔF_E

Utjecaj vanjskih sila na strujanje zraka u tunelu, odnosno interakcija zračne struje s okolinom očituje se na slijedeće načine, kao:

g1) razlika barometarskih tlakova na portalima

$$\Delta p_b = p_1 - p_2 \quad (22)$$

p_1 ... barometarski tlak na ulazu tunela [Pa]

p_2 ... barometarski tlak na izlazu tunela [Pa]

Razlika barometarskih tlakova određuje se svođenjem na istu razinu (nadmorsku visinu!)

g2) efekt dimnjaka uslijed temperaturnog gradijenta

$$\Delta p_D = \pm \rho g \frac{\Delta T}{T_0} \Delta H \quad (23)$$

pri čemu je:

g ... gravitacijska akceleracija [m/s^2]

ΔT ... razlika temperatura zraka u tunelu i okolnog zraka: $T_{tm} - T_{OK}$ [K],
max. 15 K za klimatske uvjete Hrvatske. U slučaju požara ΔT može iznositi i do 65 K, kao prosječna temperaturna razlika požara od 30 MW na području djelovanja na dužini od 800 m [81].

T_{tm} ... srednja temperatura zraka u unutrašnjosti tunela [K]

ΔH ... geodetska visinska razlika portala tunela [m]

g3) utjecaj vjetra na portalima

$$\Delta p_V = C_V \rho \frac{v_V^2}{2} \cos(\alpha_V) \quad (24)$$

pri čemu je:

C_V ... koeficijent oblika portala (za klasične izvedbe tipično 0,7)

v_V ... brzina vjetra, prema traženom kriteriju učestalosti [m/s]

α_V ... kut naleta vjetra u odnosu na os tunela [°]

g4) ulazno/izlazni gubici strujanja

Ulazni gubici strujanja određuju se prema izrazu:

$$\Delta p_{ul} = -\frac{\rho}{2} \zeta_{ul} u |u| \quad (25)$$

a izlazni gubici prema izrazu:

$$\Delta p_{izl} = -\frac{\rho}{2} \zeta_{izl} u |u| \quad (26)$$

pri čemu je:

ζ_{ul} - koeficijent ulaznih gubitaka (tipično 0,5)

ζ_{izl} - koeficijent izlaznih gubitaka (tipično 1,0)

g5) dinamička konverzija statičkih tlakova na portalima

$$\Delta p_{DC} = \frac{\rho}{2} (u_{izl}^2 - u_{ul}^2) \quad (27)$$

pri čemu je:

u_{izl} ... uzdužna brzina strujanja na izlaznom portalu [m/s]

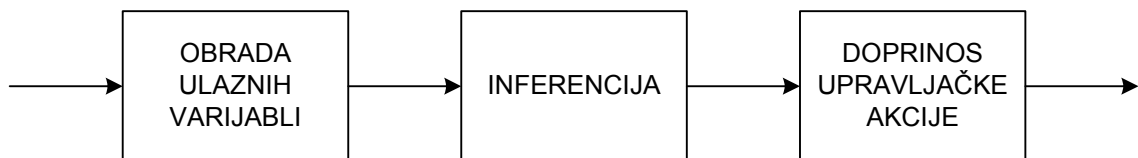
u_{ul} ... uzdužna brzina strujanja na ulaznom portalu [m/s]

Za tunele s konstantnim poprečnim presjekom, ovaj član jednadžbe je jednak nuli!

6.3. Definiranje općeg regulacijskog modela

6.3.1. Uvodne napomene

Kreiranje modela upravljanja ventilacijom cestovnog tunela u cilju kontrole uzdužnog strujanja u svim režimima rada (normalni pogon i požar) predstavlja složeni regulacijski problem čija detaljna elaboracija nadilazi okvire ovoga rada i zahtjeva interdisciplinarni specijalistički pristup. U spomenutom regulacijskom modelu su, kroz brojne dijagrame toka specifičnih upravljačkih akcija, sadržane zakonitosti i odnosi definirani prethodno obrazloženim matematičkim modelom. Središnji dio predmetnog regulacijskog modela je algoritam kontrole uzdužnog strujanja zraka, predstavljen blok shemom na Slici 34.



Slika 34. Blok shema algoritma kontrole uzdužnog strujanja zraka u tunelu

Blok shema algoritma krajnje simplificira proces upravljanja i prikazuje samo funkcionalne blokove, bez niza parametara (varijabli) i operacija koje se u njima obavljaju. Broj i struktura spomenutih varijabli, kojih ima preko 50 za konkretan algoritam, znatno je složenija i za ilustraciju se navodi u Tablici 13. (*op.a.*: zadržano izvorno indeksiranje, preuzeto izravno iz tehničke dokumentacije!).

Algoritam kontrole uzdužnog strujanja se principijelno sastoji od tri dijela:

- obrade ulaznih podataka,
- inferencije, odnosno određivanja potrebne upravljačke akcije, te
- doprinosa upravljačke akcije, odnosno određivanja ventilatora koji će obaviti upravljačku akciju.

Algoritam je stalno aktivan, dok upravljačka akcija ovisi o odabranom modu rada. Algoritam se izvodi ciklički s konstantnim vremenom izvođenja jednog ciklusa (u konkretnom slučaju predmetnog algoritma, trajanje ciklusa iznosi $t = 10$ s).

Tablica 13. Parametri algoritma kontrole uzdužnog strujanja zraka u cestovnom tunelu [82]

Opis varijable	Oznaka	Dimenzija matrice	Tip	Jedinica mjere	Granice vrijednosti	Početna vrijednost
1	2	3	4	5	6	7 ⁽⁹⁾
ukupni broj baterija ventilatora po tunelskoj cijevi ⁽¹⁾	N _b		I		1 9999	
duljina tunela	L _t		R	m	1 99999.9999	
broj ventilatora po bateriji	N _{vb}		I		1 9999	
ukupni broj mjernih točaka odnosno senzora brzine strujanja zraka po tunelskoj cijevi ⁽²⁾	N _s		I		1 9999	
ukupni broj vatrodajavnih zona po tunelskoj cijevi ⁽³⁾	N _z		I		1 9999	
raspored senzora po vatrodajavnim zonama - broj vatrodajavne zone u kojoj je senzor smješten	S _z	N _s x1	I		1 9999	
raspored baterija ventilatora po vatrodajavnim zonama - broj vatrod. zone u kojoj je ventilator smješten	V _z	N _b x1	I		1 9999	
vrijeme izvođenja jednog ciklusa algoritma	T _s		R	s	1 9999	
period uzorkovanja brzine i strujanja zraka	T _m		R	s	1 9999	
brojač perioda inicijalizacije mjerenih ulaznih varijabli	B _u		I		1 9999	
broj modova rada	K _m		I		1 9999	
donja granica ciljanog područja brzine strujanja zraka	U _{min}	K _m x1	R	m/s	0,0000 99,9999	
gornja granica ciljanog područja brzine strujanja zraka	U _{max}	K _m x1	R	m/s	0,0000 99,9999	
donja granica područja brzine strujanja zraka oko nule	U _{z_min}	K _m x1	R	m/s	-99,9999 0,0000	
gornja granica područja brzine strujanja zraka oko nule	U _{z_max}	K _m x1	R	m/s	0,0000 99,9999	
granica područja velikih vrijednosti brzine strujanja zraka	U _{max1}	K _m x1	R	m/s	0,0000 99,9999	
granica područja vrlo velikih vrijednosti brzine strujanja zraka	U _{max2}	K _m x1	R	m/s	0,0000 99,9999	
granica područja velikih negativnih vrijednosti brzine strujanja zraka	U _{min1}	K _m x1	R	m/s	-99,9999 0,0000	
broj područja vrijednosti brzine strujanja zraka	K _{up}		I		1 9	
parametri određivanja upravljačke akcije s obzirom na područje u koje upada vrijednost brzine strujanja zraka i mod rada	a _{du_min}	K _m x K _{up}	R			
	b _{du_min}	K _m x K _{up}	R			
	c _{du_min}	K _m x K _{up}	R			
	a _{du_max}	K _m x K _{up}	R			
	b _{du_max}	K _m x K _{up}	R			
	c _{du_max}	K _m x K _{up}	R			
	k _{nv}	K _m x K _{up}	R			
	l _{nv}	K _m x K _{up}	R			
	du _{eps}	K _m x 1	R			
maksimalni broj ventilatora za istovremeno upućivanje ili obustavu	N _{v_max}	K _m x 1	I		1 9999	
vrijeme čekanja iza upravljačke akcije	T _{i0}	K _m x 1	R	s		
matrica poželjnosti upotrebe ventilatora u uvjetima požara	V _{u2}	N _b x1	I		1 1E10	
raspored vatrodajavnih zona, udaljenost sredine vatrodajavne zone u metrima od početka tunela	Z _r	N _z x1	I	m		
koeficijent doprinosa smjera strujanja prema poziciji požara na faktor poželjnosti upotrebe ventilatora	K _{pkv_sv}		R			

1	2	3	4	5	6	7
koeficijent normiranja faktora poželjnosti upotrebe ventilatora ⁽⁴⁾	K_{pkv_n}		R			
matrica težinskih faktora rasporeda ventilatora	V_{ud}	$N_b \times N_b$	R			
konstante za proračun poželjnosti upotrebe ventilatora u uvjetima normalnog rada	K_{ud1}		R			
	K_{ud2}		R			
	n_{hm0}		R			
početna vrijednost timera od zadnje promjene stanja ventilatora	T_{cp0}		R	s		
korisnički unos željenog smjera strujanja zraka u modu odimljavanja tunela -1 – reverzni smjer 0 – nedefinirano 1 – glavni smjer	U_{d20}		I		{-1,0,1}	
početna vrijednost timera za autom. određivanje željenog smjera strujanja zraka u modu odimljavanja	T_{ud20}		R	s		
moгуći smjer dolaska vatrogasaca (unos korisnika) -1 – izlazna strana tunela 0 – obje strane 1 – ulazna strana tunela	S_{vg}		I		{-1,0,1}	
donja granica vrijednosti brzine strujanja za algoritam određivanja željene upravljačke akcije u uvjetima normalnog rada	U_{ta_min}	1x1	R	m/s		
gornja granica vrijednosti brzine strujanja za algoritam određivanja željene upravljačke akcije u uvjetima normalnog rada	U_{ta_max}	1x1	R	m/s		
parametri proračuna nelinearne integralne sume odstupanja brzine strujanja u uvjetima normalnog rada I_s	S_a	$K_{up} \times 1$	R			
parametri proračuna nelinearne integralne sume odstupanja brzine strujanja u uvjetima normalnog rada I_s	S_b	$K_{up} \times 1$	R			
parametar proračuna nelinearne integralne sume odstupanja brzine strujanja u uvjetima normalnog rada I_s	I_{tr}		R			
parametar proračuna nelinearne integralne sume odstupanja brzine strujanja u uvjetima normalnog rada I_s	S_s		R			
minimalno očekivano mrtvo vrijeme izraženo preko perioda uzorkovanja regulacijskog algoritma T_s	L_{d1}	$K_m \times 1$	I			
maksimalno očekivano mrtvo vrijeme izraženo preko perioda uzorkovanja regulacijskog algoritma T_s	L_{d2}	$K_m \times 1$	I			
koeficijent kompenzacije mrtvog vremena	k_{dvd}	$K_m \times 1$	R			

- (1) Broj baterije ventilatora je redni broj od početka tunelske cijevi u glavnom smjeru strujanja zraka.
 (2) Broj senzora brzine strujanja zraka je redni broj od početka tunelske cijevi u glavnom smjeru strujanja zraka.
 (3) Broj vatrodajne zone je redni broj od početka tunelske cijevi u glavnom smjeru strujanja zraka.
 (4) Jednak je maksimalnoj udaljenosti baterije ventilatora od sredine vatrodajne zone za tunelsku cijev.
 (5) Stupac 7 se popunjava različito za svaki konkretni tunel.

6.3.2. Struktura algoritma kontrole uzdužnog strujanja

a) Obrada ulaznih varijabli

Ulazni podaci algoritma su mjerene brzine i smjerovi strujanja zraka u mjernim točkama (senzorima brzine i smjera strujanja):

u_m [$N_s \times 1$] ... mjerene brzine i smjerovi strujanja zraka u mjernim točkama

Smjer strujanja zraka je označen predznakom brzine strujanja zraka, s time što je brzina strujanja zraka pozitivna ako je u nazivnom smjeru ventilacije, odnosno negativna ako je u suprotnom smjeru. Period uzorkovanja, odnosno dohvata nove vrijednosti brzine strujanja zraka je:

$t_m = 2 \text{ s}$... period uzorkovanja brzine i smjera strujanja zraka

Obradom ulaznih varijabli, tj. brzina strujanja zraka, dolazi se do procjene (estimacije) brzine strujanja u tekućem ciklusu proračuna:

u_t - procjena brzine strujanja u tekućem ciklusu

du_t - procjena promjene brzine strujanja u tekućem ciklusu

Obrada ulaznih varijabli je dio algoritma koji se izvršava u svim modovima rada kao i u slučaju da nije odabran niti jedan mod rada.

b) Inferencija

Inferencija je centralni dio algoritma koji sadrži logiku odlučivanja o upravljačkoj akciji. Inferencija uključuje tri različita moda rada, odnosno tri algoritma, s obzirom na tri različita zahtjeva na željenu brzinu reakcije, smjer strujanja i granice željene brzine strujanja:

1. umirivanje zračne struje u uvjetima požara (*Podprogram 1*);
2. odimljavanje tunela nakon umirivanja (stabilizacije) zračne struje, u uvjetima požara (*Podprogram 2*);
3. redukcija brzine zračne struje u uvjetima normalnog rada (*Podprogram 3*).

U zavisnosti od odabranog moda rada izvršava se prvi, drugi ili treći algoritam, odnosno Podprogram:

M - odabrani mod rada, vrijednost iz skupa {0, 1, 2, 3}, gdje je 0 oznaka pasivnosti algoritma, a vrijednosti 1, 2 i 3 oznake pojedinog algoritma inferencije.

Ulazne varijable za svaki od tri algoritma inferencije su estimacija brzine strujanja zraka u_t te promjene brzine strujanja zraka du_t u tekućem ciklusu, tj. izlazne vrijednosti prethodnog dijela (obrade ulaznih podataka).

Izlazna vrijednost svakog od tri algoritama inferencije je broj i smjer ventilatora koje je potrebno uputiti ili obustaviti:

N_v - broj i smjer ventilatora koje je potrebno uputiti ili obustaviti

Negativne vrijednosti N_v znače obustavu ventilatora u redovnom ili upućivanje u reverznom smjeru, pozitivne vrijednosti znače upućivanje u redovnom ili obustavu u reverznom smjeru. Vrijednost $N_v = 0$ znači da se ne traži upravljačka akcija u tekućem ciklusu.

c) Doprinos upravljačke akcije

Ulazna varijabla algoritma doprinosa upravljačke akcije je broj i smjer ventilatora koje je potrebno uputiti ili obustaviti. Na temelju broja i smjera ventilatora koje je potrebno uputiti ili obustaviti, trenutnog stanja aktivnosti ventilatora, te parametara poželjnosti upotrebe pojedinog ventilatora, algoritam određuje ventilatore koji će biti upućeni/obustavljeni.

Izlazna vrijednost je ažurirana matrica naređenih stanja ventilatora:

$V_c [N_b \times N_{vb}]$ - matrica naređenih stanja ventilatora

Nakon izvršenja ciklusa algoritma očekuje se izvršavanje upućivanja ili obustavljanja ventilatora prema stanjima u matrici naređenih stanja ventilatora.

6.4. Postupak verifikacije regulacijskog modela

6.4.1. Uvodne napomene

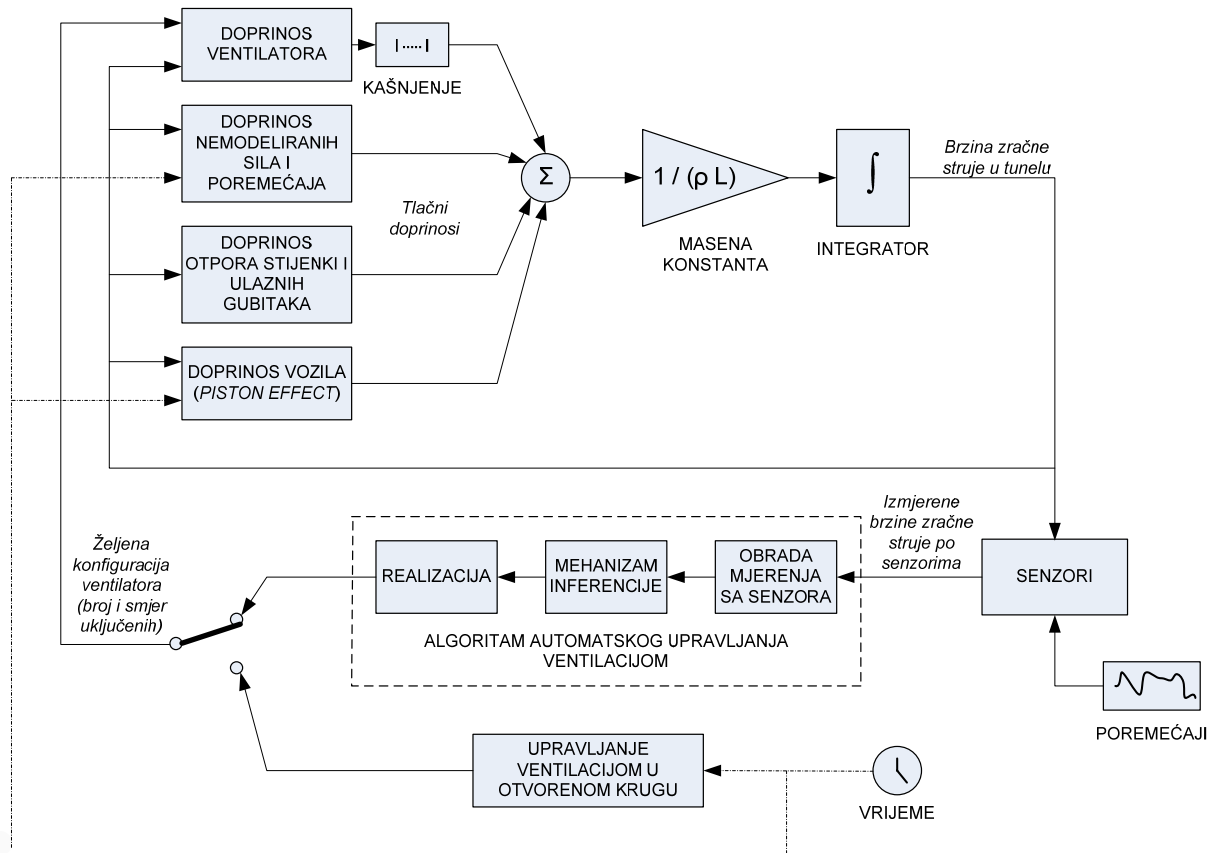
Predmetni regulacijski model predstavlja temeljni dio i okosnicu programske podrške za kontrolu uzdužnog strujanja zraka u cestovnom tunelu. Verifikaciju spomenutog regulacijskog modela potrebno je izvršiti sukcesivno u 2 stupnja, kako slijedi:

- 1. stupanj:** provjera regulacijskog modela u laboratorijskim uvjetima, postupkom numeričke simulacije sa specijaliziranim programima (npr. program SIMULINK[®]);
- 2. stupanj:** provjera regulacijskog modela u realnim eksploatacijskim uvjetima na terenu („*in situ*“), nakon implementacije programske podrške za kontrolu uzdužnog strujanja u SCADA sustav tunela. Ugrađeni računalni program za kontrolu uzdužnog strujanja se aktivno nadzire tijekom probnog pogona, u realnim uvjetima prometovanja tunelom. Provjera uključuje i provedbu posebno prilagođenih požarnih testova kojima će se simulirati specifičnosti strujanja u uvjetima požarnog incidenta.

6.4.2. Verifikacija regulacijskog modela postupkom numeričke simulacije

Kao što je već rečeno, provjera regulacijskog modela u laboratorijskim uvjetima obavlja se pomoću specijalističkih aplikativnih programa. U konkretnom slučaju korišten je SIMULINK[®], namijenjen za simulaciju rada složenih modela upravljanja. Njime je omogućeno da se predloženi model upravljanja ventilacijom, u virtualnom okruženju aerodinamike tunela, podvrgne dinamici upravljanja koja je najbližnja realnim eksploatacijskim uvjetima. Na taj način je omogućena provjera različitih regulacijskih modela u ranoj fazi njihovog razvoja i njihove moguće korekcije, prije skupe i složene implementacije u SCADA sustave određenih objekata, u ovom slučaju tunela.

Virtualno okruženje tunela u aerodinamičkom i regulacijskom smislu sadržano je u simulacijskom modelu upravljanja zračnom strujom, prikazanom u obliku blok-dijagrama na Slici 35. Model pretpostavlja da je uzdužna brzina zračne struje jednaka duž čitavog tunela.



Slika 35. Blok dijagram simulacijskog modela upravljanja uzdužnom brzinom zračne struje

Opis pojedinih blokova simulacijskog modela:

Senzori: Stvarna vrijednost brzine zračne struje se raspoređuje u N_s senzora; nadodaju se poremećaji (dugoperiodične oscilacije, šum mjerenja i dr.) pojedinačno za svaki senzor.

Obrada mjerenja sa senzora: Nalazi srednju vrijednost mjerenja senzora u_s , i njezinu vremensku promjenu (t_s = period uzorkovanja): $du_s(k) = (u_s(k) - u_s(k-1)) / t_s$

Mehanizam inferencije: Nalazi željenu vrijednost upravljačke akcije, kao broj/smjer ventilatora koje treba uputiti ili obustaviti. Različite varijante za različite modove rada ventilacijskog sustava (Podprogrami 1, 2 i 3).

Realizacija: Raspodjela zadane upravljačke akcije na ventilatore: prati stanje ventilatorskog sustava i nalazi koje ventilatore će se uputiti ili obustaviti. Pritom se gleda ispravnost ventilatora, njihov položaj u odnosu na mjesto požara, broj sati rada i dr.

Upravljanje ventilacijom u otvorenom krugu: Zadaje željenu konfiguraciju ventilacije (broj i smjer uključenih ventilatora) kao funkciju simulacijskog vremena. Služi za ispitivanje sustava bez aktivne automatske kontrole ventilacije.

Doprinos ventilatora: Nalazi tlačni doprinos ventilatora prema statičkoj formuli (16) navedenoj u Poglavlju 6.2.3.2. Dinamika je modelirana grubo, kašnjenjem prvog reda i mrtvim vremenom primijenjenim na gore definirani statički tlačni doprinos (tj. zajedničkim za sve ventilatore).

Doprinos nemodeliranih sila i poremećaja: Uključuje učinak vjetra, razlike barometarskih tlakova, efekta dimnjaka, doprinose uslijed požara (*“blockage”* efekt plamena) i dr. Statički se zadaje kao vremenska skripta; moguća je (ali se rjeđe koristi) ovisnost o uzdužnoj brzini zračne struje u . Dinamiku modelira kašnjenje prvog reda.

Doprinos otpora stijenki, ulaznih i izlaznih gubitaka: Računa se prema formuli koja predstavlja kombinaciju izraza (18), (25) i (26), s ciljem grupiranja „kvadratnih“ otpora:

$$-\frac{\rho}{2} \left(\lambda \frac{L}{D} + \zeta_{ul} + \zeta_{izl} \right) u |u| \quad (28)$$

Doprinos vozila (efekt „klipa“): Modelira se prema statičkoj formuli (20). Budući da su parametri i_F, A_F različiti za osobna vozila, te za kamione i autobuse, svaki tip vozila se modelira zasebno (2 jednadžbe čiji se doprinosi zbrajaju). Dinamika je modelirana kašnjenjem prvog reda primijenjenim na gore definirane statičke tlačne doprinose (zasebno za automobile i za kamione).

Integracija: Suma svih tlačnih doprinosa (u [Pa]) se dijeli masenom konstantom ($\rho \cdot L$) [kg / m²] (ρ = gustoća zraka; L = duljina tunelske cijevi), i potom podvrgava postupku numeričke integracije kako bi se dobila brzina zračne struje u tunelu u_z . Koristi se neka od složenijih formula numeričke integracije, pod kontrolom simulacijskog programskog paketa.

6.4.3. Rezultati numeričke simulacije regulacijskog modela

6.4.3.1. Uvod

Kao što je već u nekoliko navrata rečeno, temeljna zadaća programske podrške za kontrolu uzdužnog strujanja je efikasno umirivanje i stabilizacija zračne struje u početnoj fazi požara, koja je ujedno i najosjetljivija za ishod i uspješnost procesa evakuacije. Iako pored ove zadaće, koja se obavlja već obrazloženim *Podprogramom 1*, programska podrška ima i druge zadaće u ostalim fazama požara i redovnog pogona, regulacijski je svakako najzanimljiviji i najzahtjevniji spomenuti postupak umirivanja i stabilizacije zračne struje.

Upravo zbog navedenih razloga, provjera regulacijskog modela se obavlja sa zahtjevom što efikasnije (brže) redukcije uzdužne brzine zračne struje i njene stabilizacije unutar unaprijed određenog područja brzina.

Pri tome će se pratiti sljedeći parametri procesa umirivanja i stabilizacije zračne struje:

- a) vremenska distribucija brzina, prikazana $u - \tau$ dijagramima, pomoću kojih se opisuje dinamika promatranog procesa i gdje su vidljive sve eventualne anomalije u djelovanju regulacijskog modela;
- b) integral brzine zračne struje, kojim se određuje put koji prijeđe zračna masa od trenutka pokretanja odgovarajuće upravljačke akcije do trenutka ulaska u zadani interval brzina.

Gore navedeni parametri procesa će se pratiti za različite tlačne razlike (gradijente tlaka) uspostavljene na portalima hipotetskog tunela⁴⁵ i za različite početne brzine strujanja zraka (u_0), čime će se dobiti zadovoljavajući broj pogonskih stanja na koja će biti primijenjena provjera regulacijskog modela.

Potrebno je istaknuti da se u predstojećoj provjeri regulacijskog modela ne barata sa specifičnostima širenja dima u uvjetima požara, koji kao što je već obrazloženo u ranijim poglavljima ovog rada, u uvjetima stratificiranog strujanja ima sliku strujanja bitno različitu od slike strujanja okolnog ili nadolazećeg zraka. Predstojeća analiza pogotovo nije primjenljiva za zonu strujanja u neposrednoj blizini požara.

⁴⁵ za konkretnu analizu su korištene geometrijske i pogonske karakteristike tunela Mala Kapela.

- (!) Međutim, ova ograničenja po mišljenju autora ne umanjuju vrijednost i vjerodostojnost provjere predmetnog regulacijskog modela, obzirom da je isti koncipiran tako da djelovanje požara „prepoznaje“ samo kao dodatni otpor, kojemu se prilagođava povećanjem doprinosa (broja) ventilatora koji sudjeluju u upravljačkoj akciji, u odnosu na stanje strujanja bez požara.

6.4.3.2. Izračun integrala brzine zračne struje

Izračun integrala brzine zračne struje daje put koji prijeđe zračna masa od trenutka pokretanja odgovarajuće upravljačke akcije (npr. uključivanja ventilatora) do trenutka ulaska u zadani interval brzina. U prvoj aproksimaciji izračunati put može odgovarati i putu koji prijeđe homogena mješavina dima i zraka, što omogućuje aplikaciju ovog proračuna i za slučaj požarnog incidenta, ali uz neophodni oprez u interpretaciji rezultata.

Traženi integral se izračunava prema izrazu:

$$S_i = u_0 \cdot (t_1 - t_0) + \int_{t_1}^{t_2} u_i(t) \cdot dt \quad (29)$$

pri čemu je:

S_i ... vrijednost integrala za odziv (pokusi)

$u_i(t)$... brzina zračne struje pri odzivu (pokusu)

u_0 ... početna vrijednost brzine zračne struje

t_0 ... trenutak početka pokusa

t_1 ... trenutak u kome (nakon kašnjenja / mrtvih vremena) počinje promjena $u(t)$

t_2 ... trenutak završetka pokusa, u kojem brzina zračne struje uđe u ciljni interval $1,0 \div 1,5$ m/s (tj. kada je $u_i(t) = 1,5$ m/s po prvi puta)

Drugi sumand u izrazu (29) predstavlja integral brzine u užem smislu, koji označavamo:

$$I_i = \int_{t_1}^{t_2} u_i(t) \cdot dt \quad (30)$$

Zadane su slijedeće početne vrijednosti brzina zračne struje:

$$u_0 = 3; 4; 5; 6 \text{ [m/s]}$$

Pretpostavljamo:

$$t_0 = 30 \text{ s}; t_4 = 40 \text{ s}$$

$$N_{\max} = 6 \dots \text{maksimalni broj ventilatora koji se može uključiti istovremeno (odabrano)}$$

Obzirom na vanjske uvjete, odnosno na različite tlačne razlike uspostavljene na portalima tunela, te pogonska stanja ventilacijskog sustava, razlikujemo slijedeće hipotetske slučajeve procesa umirivanja i stabilizacije zračne struje:

Slučaj A: nema ventilacije; u $t = t_4$ vanjska razlika tlakova nestaje ($u \rightarrow 0 \text{ m/s}$)

Slučaj B: nema ventilacije, vanjska razlika tlakova konstantna ($u = \text{konst.}$)

Slučaj C: ventilacija kreće od $t = t_0$; vanjska razlika tlakova konstantna

Slučaj D: ventilacija kreće od $t = t_0$; u $t = t_4$ vanjska razlika tlakova nestaje

Izračun je obavljen za karakteristične podatke tunela *Mala Kapela*:

$$\zeta_{ul} + \zeta_{izl} = 1,5; l_s = 5.760 \text{ m}; D = 7,8 \text{ m}; \lambda = 0,024; \rho = 1,207 \text{ kg/m}^3$$

Iz modela tunelske ventilacije proizlaze sljedeći rezultati:

$$u_0 = [3 \quad 4 \quad 5 \quad 6] \quad [\text{m/s}]$$

$$\Delta p_V = [104,7 \quad 186,1 \quad 290,7 \quad 418,6] \quad [\text{Pa}] \quad \text{vanjski tlak koji drži } u_0$$

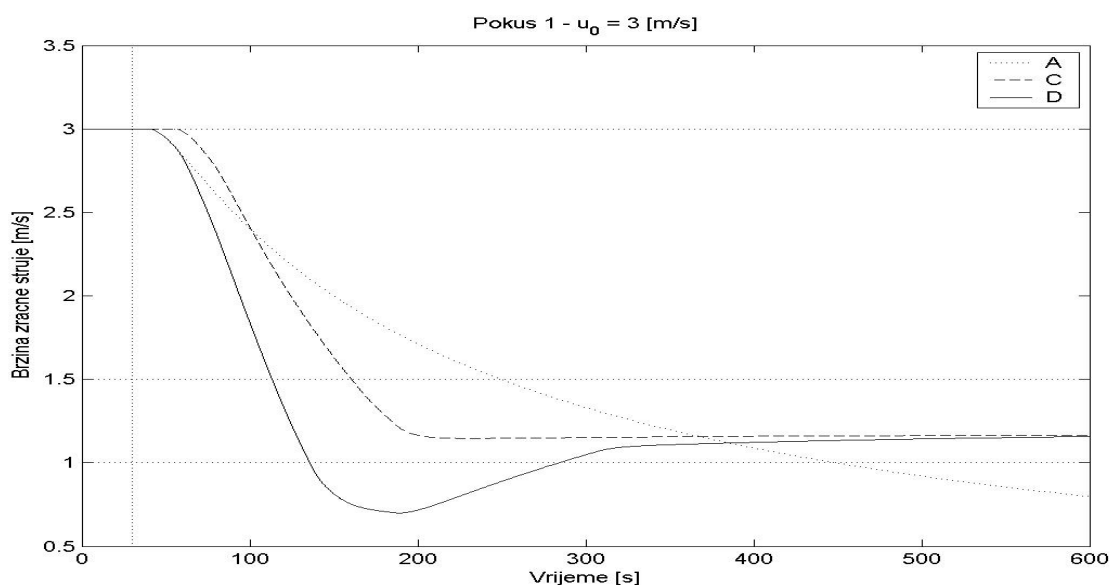
$$N_0 = [6,9 \quad 12,7 \quad 20,6 \quad 31,0] \quad \text{broj ventilatora potreban da se postigne } u_0 \text{ ako nema vanjskog tlaka.}$$

Tablica 14. Izračun integrala I_i brzine zračne struje

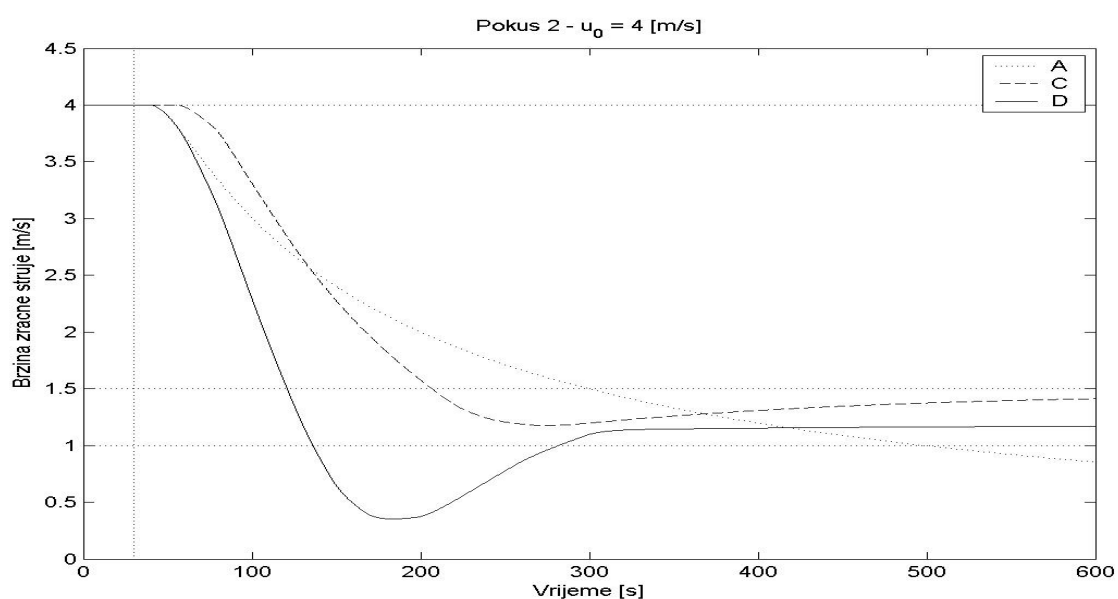
u_0 [m/s]		I_A [m]	I_B [m]	I_C [m]	I_D [m]
3	$t_A = 250$ [s]	475	660	324	225
	$t_C = 161$ [s]	425	392	316	230
	$t_D = 113$ [s]	322	250	254	205
4	$t_A = 300$ [s]	668	1079	509	312
	$t_C = 207$ [s]	629	708	513	333
	$t_D = 121$ [s]	406	364	334	278
5	$t_A = 330$ [s]	822	1500	757	416
	$t_C = 289$ [s]	876	1295	819	468
	$t_D = 134$ [s]	570	518	517	368
6	$t_A = 350$ [s]	952	1920	959	526
	$t_C = 355$ [s]	1107	1949	1115	626
	$t_D = 147$ [s]	696	701	702	458

6.4.3.3. Dinamika procesa umirivanja i stabilizacije brzine zračne struje

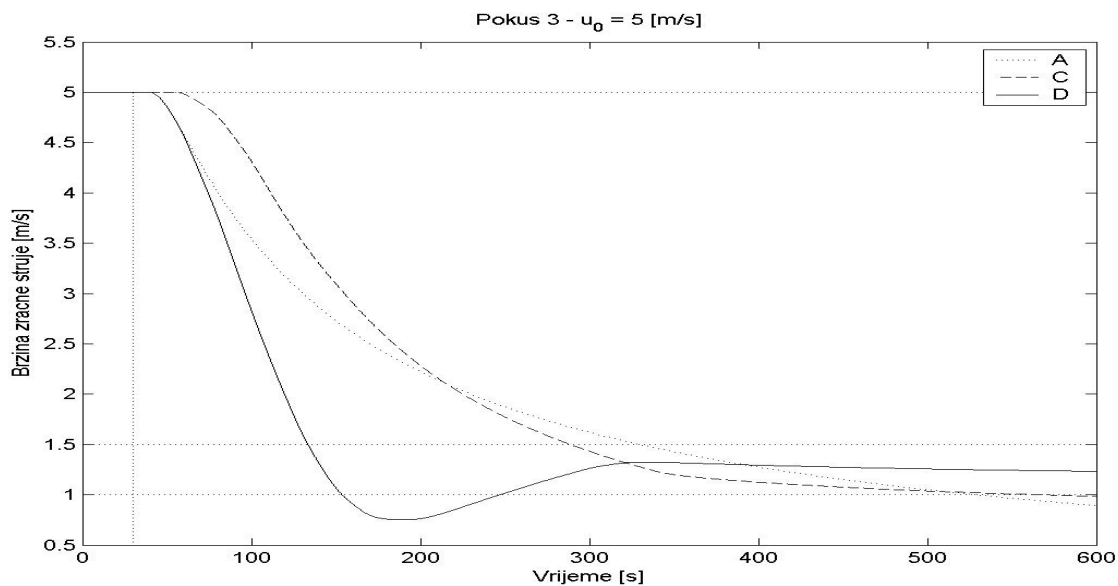
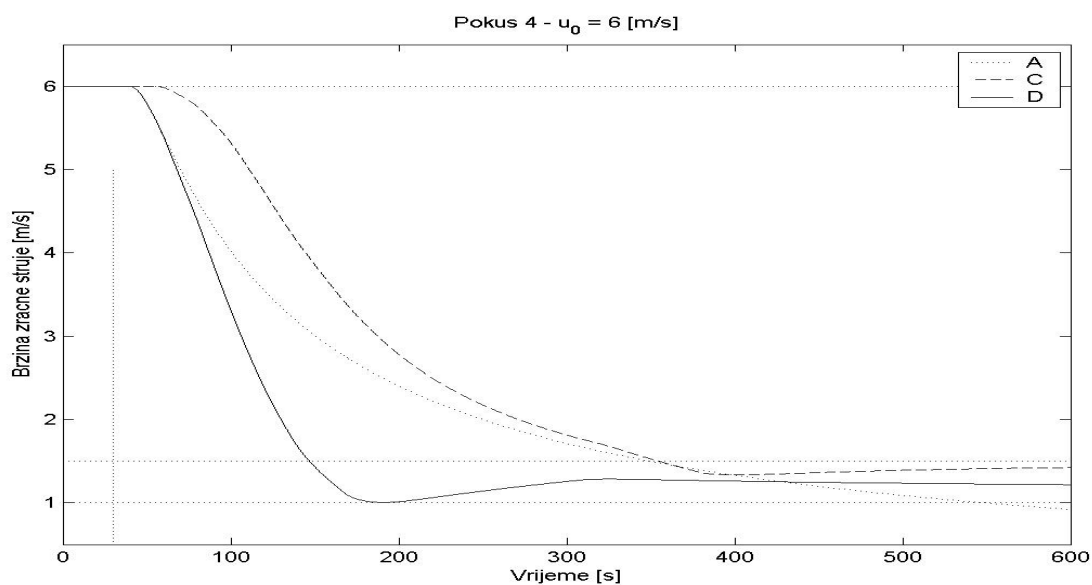
Simulacijom procesa upravljanja zračnom strujom u tunelu, na temelju simulacijskog modela prikazanog na Slici 34., dobivamo krivulje vremenske distribucije brzina, prikazane u $u - \tau$ dijagramima. Predmetni dijagrami zorno prikazuju dinamiku procesa i omogućavaju analizu procesa upravljanja.



Slika 36. Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0 = 3$ m/s



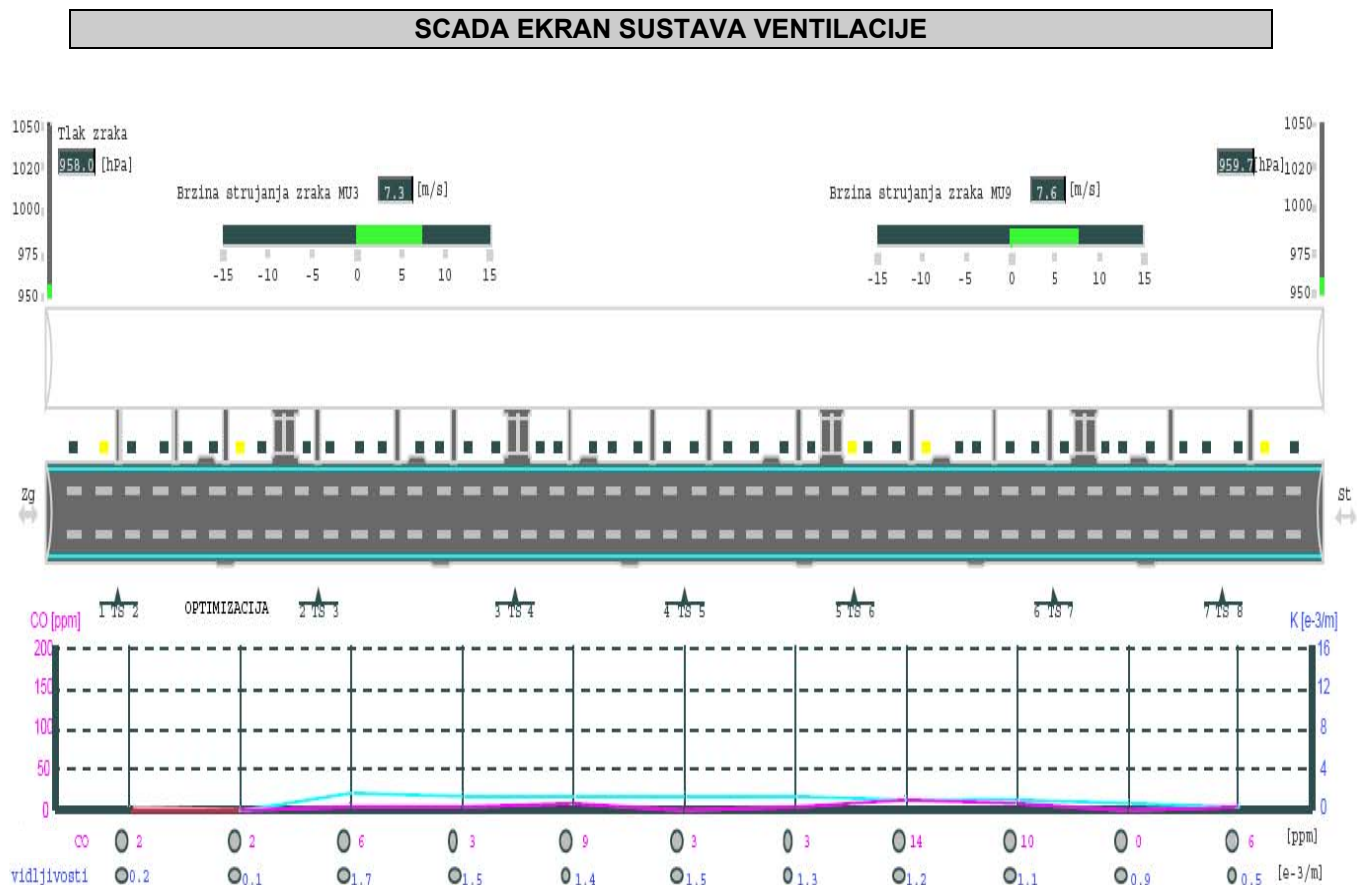
Slika 37. Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0 = 4$ m/s

Slika 38. Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0 = 5$ m/sSlika 39. Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0 = 6$ m/s

Komentar: iz dijagrama je vidljivo da proces aktivnog djelovanja sustava ventilacije na proces redukcije i stabilizacije uzdužne struje zraka ima očigledne pozitivne efekte, pogotovo kada se sustavu ventilacije ne suprotstavlja znatniji pretlak na portalima tunela (krivulja D). Također se može zaključiti da se sustav ventilacije efikasno prilagođava promjenama početne brzine strujanja, jer 2-struko povećanje početne brzine ($3\text{ m/s} \rightarrow 6\text{ m/s}$) rezultira s prolongiranjem vremena redukcija za samo 30% ($113\text{ s} \rightarrow 147\text{ s}$)!

Nadalje, provedena simulacija ukazuje da je sustav regulacije stabilan u odnosu na mogućnost nekontrolirane reverzije smjera strujanja, do koje nije došlo niti u jednom od promatranih slučajeva. Spomenuta reverzija smjera izuzetno je opasana u inicijalnim fazama požara, kada se želi očuvati stratifikacijsko (slojevito) strujanje dima.

Potrebno je također naglasiti da u slučaju konstantne razlike vanjskih tlakova na portalima (tip strujanja opisan krivuljom „B“), koji su najčešće rezultat utjecaja vjetrova, uzdužna brzina zraka može biti vrlo visoka, pogotovo u slučaju djelovanja olujnih vjetrova, kao što je bura (Slika 39.). U navedenim uvjetima, evakuacija putnika u slučaju požara postaje izrazito otežana, zbog brzog širenja dima i gotovo trenutne opstrukcije stratifikacijskog strujanja. Spomenute uvjete treba izbjegavati odgovarajućom lokacijom i izvedbom portala, te dimenzioniranjem sustava ventilacije sa stanovitom rezervom potrebnom za umirivanje tako izazvane zračne struje unutar tunela.



Slika 40. Prikaz parametara sustava ventilacije tunela *Sveti Rok* pod djelovanjem bure (uzdužna brzina zraka nastala djelovanjem bure: $u_{01}=7,3$ m/s; $u_{02}=7,6$ m/s, ventilacija isključena!)

7. IMPLEMENTACIJA OPERATIVNE STRATEGIJE

Prilikom implementacije bilo koje operativne strategije rada sustava ventilacije, bez obzira na njene specifičnosti i unutarnju strukturu, potrebno je ispuniti određene preduvjete, koji su neophodni da bi svi predviđeni modaliteti rada ventilacijskog sustava dali optimalne rezultate. Spomenuti preduvjeti se odnose na:

- a) organizacijske mjere i koherentnost rada ostalih sustava;
- b) pogonske karakteristike i stanje opreme.

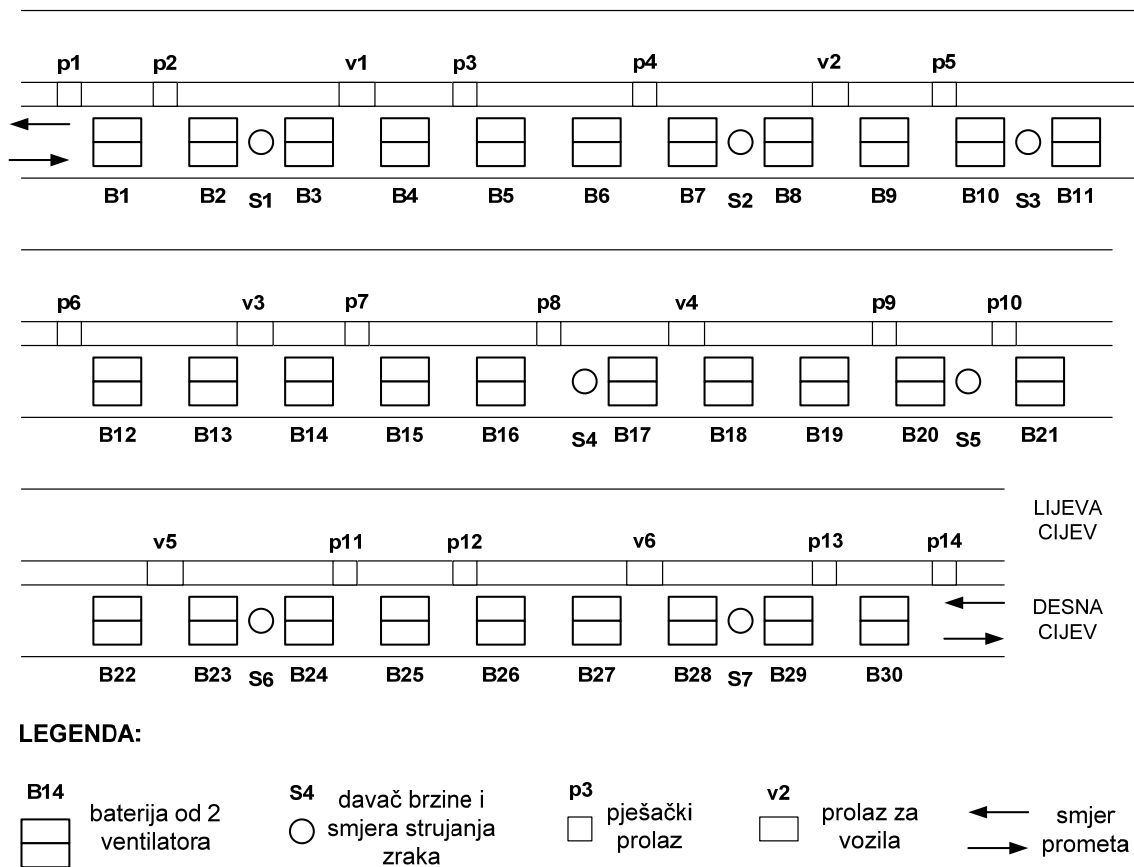
7.1. Organizacijske mjere i koherentnost rada ostalih sustava

Odnose se na razinu kadrovske osposobljenost operatera i interventnih službi, kao i na razinu implementacije ostalih operativnih strategija, scenarija i procedura u sustav daljinskog upravljanja i nadzora tunelom. Kao što je već obrazloženo u Poglavlju 4.1.2. i prikazano Tablicom 2., neophodno je da i ostali sustavi koji participiraju u zaštiti od požara imaju razrađene scenarije djelovanja za slučaj požara, te da na temelju sinergijskog djelovanja koordinirano djeluje u uvjetima požara. Izolirani pokušaji implementacije operativne strategije sustava ventilacije, uz nedovoljno educirano osoblje neće polučiti očekivane rezultate u praksi, bez obzira na njenu objektivnu vrijednost i efikasnost .

7.2. Pogonske karakteristike i stanje opreme

Kao sljedeći preduvjet uspješnosti implementacije operativne strategije, a pogotovo pripadajuće programske podrške, navodi se provjera pogonskih karakteristika i stanja opreme. Svakako najvažnija oprema za provedbu određene operativne strategije rada ventilacijskog sustava su ventilatori (u pravilu impulsni) i kombinirani senzori brzine i smjera strujanja, što je vidljivo i na blok dijagramu simulacijskog modela (vidi Sliku 34.). Pri tome se pretpostavlja da su funkcionalne veze sustava daljinskog upravljanja i navedene opreme ispravne, a cjelokupni sustav upravljanja u punoj pogonskoj gotovosti.

Najosjetljiviji dio gore opisanog upravljačkog lanca su bez svake sumnje kombinirani senzori brzine i smjera strujanja. Istovremeno, njihovo pravilno funkcioniranje je najvažnije za ishod procesa upravljanja, te će zbog toga o njima biti više riječi u predstojećem tekstu, sa prikazom realnih problema. Dispozicija ventilacijske opreme i pripadajućih senzora dana je na Slici 40. (preuzet primjer rasporeda opreme za tunela Mala Kapela [78]).



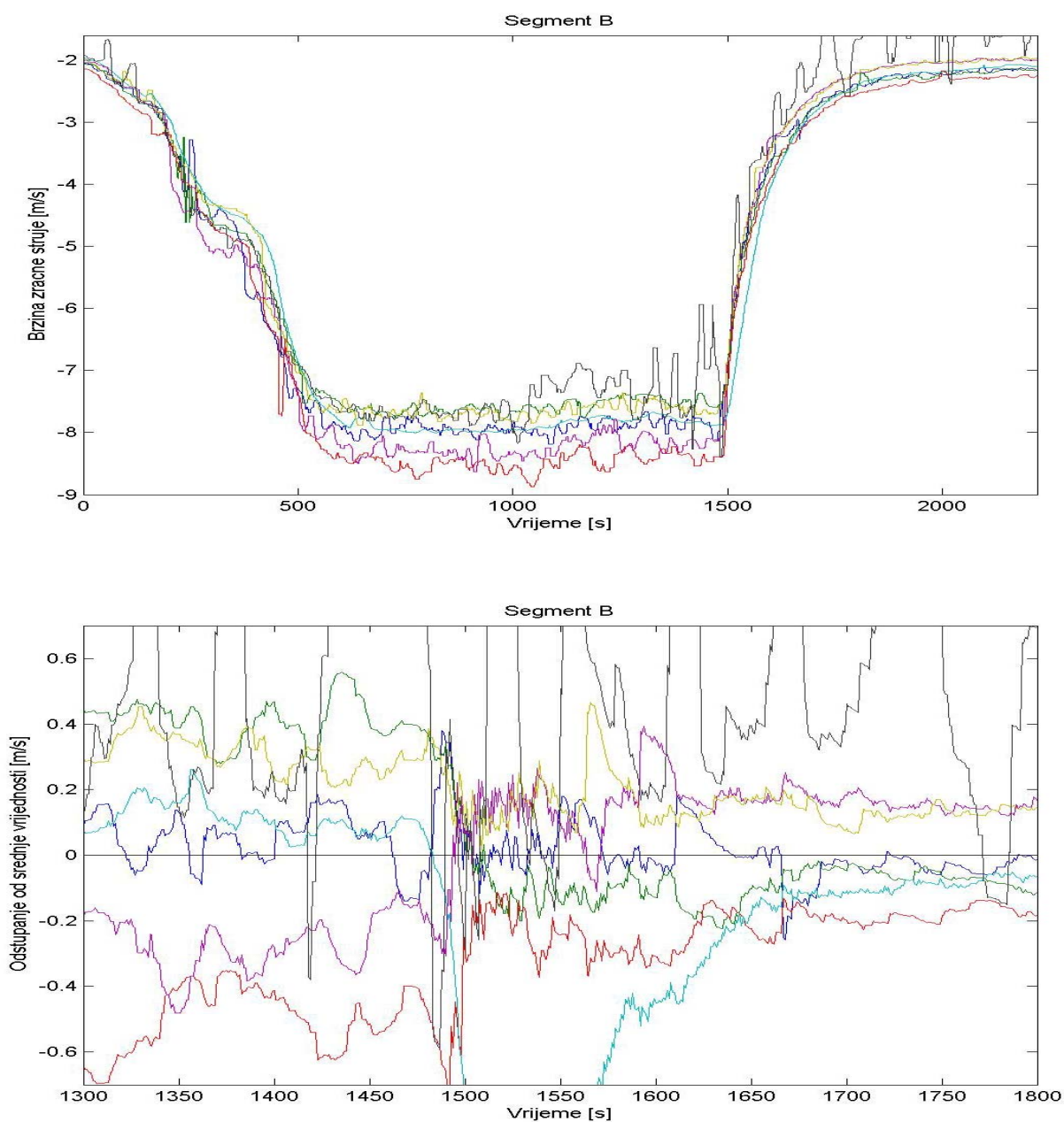
Slika 41. Shematski prikaz rasporeda ventilatora i kombiniranih senzora brzine/smjera strujanja (primjer tunela *Mala Kapela*)

Analizirani tunel opremljen je sa 30 ventilatorskih baterija od po 2 ventilatora i sa 7 kombiniranih senzora brzine i smjera strujanja.

Zbog prilagodbe općeg regulacijskog modela, izrađenog u parametarskoj formi, konkretnim uvjetima pogona u određenom tunelu (→ kreiranje tzv. *"customized model"-a*), potrebno je obaviti terenska mjerenja. Na njima se određuju dinamički parametri ventilacijskog sustava (transportno kašnjenje, deceleracijska krivulja, ukupni koeficijent otpora i sl.) i dinamičke karakteristike poremećaja izazvanih prometom i drugim stohastičkim uzrocima. Mjerenja se sastoje od uključivanja i isključivanja ventilatora tunela prema unaprijed definiranom rasporedu, uz kontinuirano bilježenje izmjerene brzine strujanja zraka u svim mjernim točkama. Pokazivanje svih 7 senzora brzine i smjera strujanja zraka u analiziranom tunelu obavljeno je pomoću SCADA-inog „data logger“, sa periodom uzorkovanja 1s i rezolucijom 0,01 m/s. Zbog lakšeg praćenja snimljenih brzina zračne struje, svakom senzoru je pridružena odgovarajuća boja prema Tablici 15.

Tablica 15. Legenda boja za kombinirane senzore brzine i smjera strujanja

Senzor	Boja crte	Senzor	Boja crte
S1	Plava	S5	Ljubičasta (magenta)
S2	Zelena	S6	Žuta
S3	Crvena	S7	Crna
S4	Svjetloplava (cijan)		



Slika 42. Izmjerena brzina zračne struje u 7 senzora (gore)
i odstupanja mjerenja pojedinih senzora od srednje vrijednosti mjerenja (dolje) [78]

Komentar: analizom izmjerenih brzina zračne struje u 7 promatраних senzora, vidljivo je da dio senzora usuglašeno djeluje uz tolerantna odstupanja. Međutim, uočava se da je senzor S7 (crno) postao neispravan od oko 1000B [s] nadalje, a senzor S5 (ljubičasto) reagira sporije od ostalih senzora na brze promjene mjerene veličine. Neispravnost senzora S7 ukazuje na problem dijagnostike kvara senzora, tako da SCADA sustav može prepoznati neispravne senzore i isključiti njihovo mjerenje iz daljeg proračuna. Ostaje pitanje da li navedenu dijagnostiku provesti na razini akvizicijske jedinice senzora ili u sklopu SDV-a. Karakteristika odziva senzora S5 ukazuje da senzor, odnosno pripadajuća evaluacijska jedinica ima podešeno filtriranje mjerenih signala, koje iako je poželjno u procesu upravljanja nije bilo očekivano niti sistemski podešeno i za ostale senzore.

Osim gore navedenih komentara vezanih za ilustrativan prikaz mogućih praktičnih problema u primjeni određene operativne strategije upravljanja sustavom ventilacije, potrebno je napomenuti da su zapaženi [78] i poremećaji mjerenja senzora uslijed rada bliskih ventilatora. Pri tome su izraženiji poremećaji mjerenja zapaženi kada ventilatori rade u tlačnom režimu u odnosu na smještaj senzora, tj. kada se senzori nalaze nizstrujno od ventilatora. Brojnim terenskim mjerenjima na tunelima Mala Kapela, Brinje, Plasina i Grič ustanovljeno je da udaljenost senzora od ventilatora mora iznositi minimalno 30 m, a svakako poželjni optimum je polovica udaljenosti između 2 ventilatorske baterije!

(!) **Prije implementacije određene operativne strategije i njoj pripadajućih računalnih programa za upravljanje radom sustava ventilacije u uvjetima požara, potrebno je osigurati istu razinu implementacije strategija, scenarija i procedura ostalih sustava koji participiraju u zaštiti od požara, kao i odgovarajuću osposobljenost operatera i interventnih službi. Također je veoma važno da se provjeri stanje opreme i njene pogonske karakteristike, misleći pritom prvenstveno na snimanje i podešavanje mjernih karakteristika kombiniranih senzora brzine i smjera strujanja.**

Iako nije u neposrednoj vezi s gore opisanom fazom implementacije, potrebno je napomenuti da **aktivno upravljanje** sustavom ventilacije podrazumijeva da se već u fazi realizacije projektne zamisli osiguraju svi neophodni uvjeti za uspješnu primjenu predmetne operativne strategije. To podrazumijeva određenu redundanciju u kapacitetu ventilacijskog sustava, kao i povećani broj kombiniranih senzora brzine i smjera strujanja.

8. ZAKLJUČAK

U disertaciji su analizirani mogući scenariji djelovanja sustava uzdužne ventilacije cestovnog tunela u uvjetima požarnog incidenta, s ciljem povećanja zaštite i sigurnosti putnika, vatrogasnih i spasilačkih službi, kao i građevine u cjelini. Naime, sustavi ventilacije cestovnih tunela, svojim specifičnim djelovanjem na razvoj i razdiobu dima, imaju jednu od odlučujućih uloga u postupcima evakuacije putnika, te intervencije vatrogasnih i spasilačkih ekipa, ali isto tako i na sam proces požara uopće. Stoga navedena problematika sigurnosti i zaštite putnika u tunelima, kao kapitalnim objektima cestovne infrastrukture, ima izuzetan značaj u prometnom, gospodarskom, sociološkom i opće društvenom pogledu.

S posebnom pažnjom stručna i ostala javnost prati razvoj i unaprjeđenje sigurnosno-tehničkih mjera koje se provode u tunelima širom svijeta, a koje su potaknute serijom tragičnih požara u velikim europskim tunelima (*Tauern, Mont Blanc, Gotthard*). Naime, održivi razvoj europskog prometnog prostora, čiji je integralni dio Hrvatska već sada, moguć je samo pod pretpostavkom efikasnog i sigurnog kretanja ljudi i dobara, s posebnim naglaskom na sigurnost svih sudionika u procesu transporta. U tom smislu je 2004. g. Europska komisija donijela Direktivu br. 2004/54/EC o „Minimalnim sigurnosnim zahtjevima za tunele Trans-Europske cestovne mreže“, kojom se nastoje harmonizirati različite sigurnosne politike europskih zemalja u integralnom prometnom prostoru Europe.

S time u vezi, u svijetu se, a posebno u Europi, posebna pažnja posljednjih nekoliko godina posvećuje istraživanju mogućih oblika djelovanja ventilacijskih sustava na vrlo složeni mehanizam nastanka i razvoja požara, te njegovih pratećih efekata. Nažalost, djelovanje ventilacijskog sustava u realnim uvjetima požarnog incidenta često se provodi kroz različite, a ponekad i oprečne operative strategije rada. U tom smislu, ova disertacija predstavlja znanstveni doprinos autora zajedničkom naporu stručne javnosti da harmonizira raznolike strategije upravljanja ventilacijom u akcidentnim situacijama, s naglaskom na požaru.

No, bez obzira na sve znanstvene postavke koje su ugrađene u metodološkom pristupu oblikovanja operative strategije elaborirane u radu, potrebno je još jednom napomenuti da je njihovo „uvezivanje“ u logički konzistentnu i prepoznatljivu cjelinu stvar autorovog osobnog poimanja, formiranog na sveukupno stečenom znanju, iskustvu i spoznajama iz ovog specifičnog područja.

Stoga je ovdje izložena operativna strategije jedna od mogućih interpretacija djelovanja sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara i kao takva podložna je trajnoj provjeri u realnim eksploatacijskim uvjetima, kao i konstruktivnoj znanstvenoj kritici.

Konkretan znanstveni doprinos rada autor vidi u slijedećem:

- a) djelovanje sustava uzdužne ventilacije u uvjetima požara dano je kroz ***cjelovitu, konzistentnu i provedivu operativnu strategiju***, kao najvišu razinu upravljanja dinamičkim tehničkim sustavima. U njoj su, prema mišljenju autora, sadržani i funkcionalno povezani svi bitni čimbenici koji djeluju na interakciju sustava ventilacije i procesa nastanka i razvoja požara.
- b) predmetna strategija prikazana je ***generičkim algoritmima upravljanja***, kao najopćenitije strukturiranim oblicima zapisa procesa upravljanja. Pri tome je njihova unutarnja struktura potpuno neovisna o raspoloživim pogonskim mogućnostima sustava ventilacije, kao i organizacijsko-tehničkim i građevinskim specifičnostima pojedinog tunela. To ih čini univerzalno primjenjivima za slučaj djelovanja uzdužne ventilacije cestovnih tunela u uvjetima požara.
- c) specifičnom kombinacijom ručno-daljinskog i automatskog upravljanja određenim rutinskim sekvencijama rada sustava ventilacije, opisanim u predmetnoj operativnoj strategiji, ostvareni su preduvjeti da se ***bitno smanji opterećenje operatera u kriznim situacijama***, a time povećaju njegove kognitivne sposobnosti u procesu odlučivanja, uz istovremenu veću pouzdanost, brzinu i točnost upravljačke akcije.
- d) kao sastavni dio operativne strategije ***razvijen je računalni program za kontrolu uzdužnog strujanja zraka/dima u tunelu***, koji upravlja automatskim sekvencijama rada sustava ventilacije, a na teorijskoj razini potvrđen je odgovarajućom numeričkom simulacijom. Autor smatra razvoj navedenog programa ključnim za realizaciju operativne strategije u cjelini.
- e) i na kraju, autor je mišljena da je kroz točke c) i d) ***realizirana hipoteza ovog rada o „primjeni razrađenog i usavršenog algoritma upravljanja ventilacijskim sustavom u uvjetima požara,kojim je moguće postići višu razinu sigurnosti sudionika u prometu, kao i očuvanja stabilnosti same građevine u odnosu na postojeća tehnička rješenja“***.

- (!) Pored ranije navedenog, autor je mišljenja da se specifični znanstveni doprinos ovoga rada najbolje očituje u istovremenom korištenju sva tri raspoloživa istraživačka pristupa prilikom oblikovanja predmetne operativne strategije, a u kojima je autor aktivno sudjelovao. Radi se o modelskim ispitivanjima ventilacije u laboratorijskim uvjetima, sistematski provedenim „*in situ*“ ispitivanjima na terenu i simulacijama procesa razdiobe dima temeljenim na numeričkom modeliranju. Opisanim sveobuhvatnim pristupom, saznanja autora o specifičnoj problematici rada su bitno produbljena, što daje radu dodatnu teorijsku i praktičnu vrijednost.

Kao moguće pravce budućih istraživanja u području sigurnosti i zaštite cestovnih tunela i specifične uloge ventilacijskih sustava u uvjetima požara, autor vidi u:

- a) daljnjem **usavršavanju postavljenog matematičkog i regulacijskog modela** programske podrške za kontrolu uzdužnog strujanja, kroz predstojeća terenska mjerenja i specijalno prilagođene požarne testove;
- b) iznalaženju **čvršće korelacije između uspostavljenog režima strujanja** dima u uvjetima požarnog incidenta i **toplinskog opterećenja betonske konstrukcije**, odnosno sekundarne obloge tunela. Utjecaj sustava ventilacije u ovom području je očigledan, međutim po ocjeni autora još nedovoljno istražen;
- c) **uključivanju suvremenih probabilističkih simulacijskih modela** evakuacije i drugih nedeterminističkih alata iz domene analize rizika, za potrebe sigurnosne analize složenih sustava ventilacije. Time bi prezentirana operativna strategija dobila dodatnu znanstvenu argumentaciju.

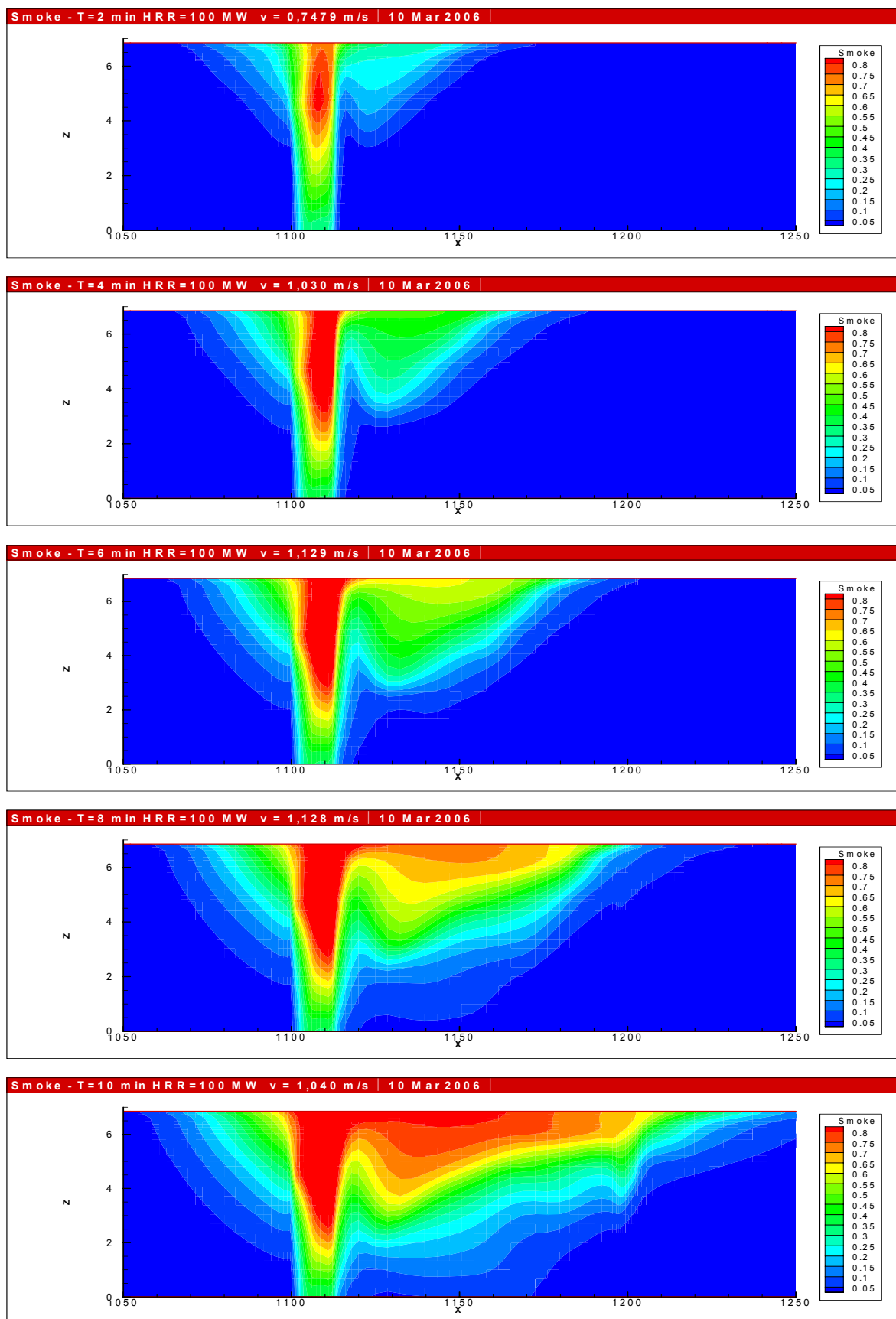
Također je potrebno, smatra autor, predmetnu strategiju upravljanja ventilacijom u uvjetima požara, prilagoditi i specifičnostima drugih akcidentnih situacija (npr. moguće terorističke ugroze koja se nameće kao realna i ujedno visoko destruktivna aktivnost u slučaju primjene u cestovnom tunelu!). U tom smislu autor već sudjeluje u određenim inicijativama na domaćoj i međunarodnoj razini.

9. PRILOZI

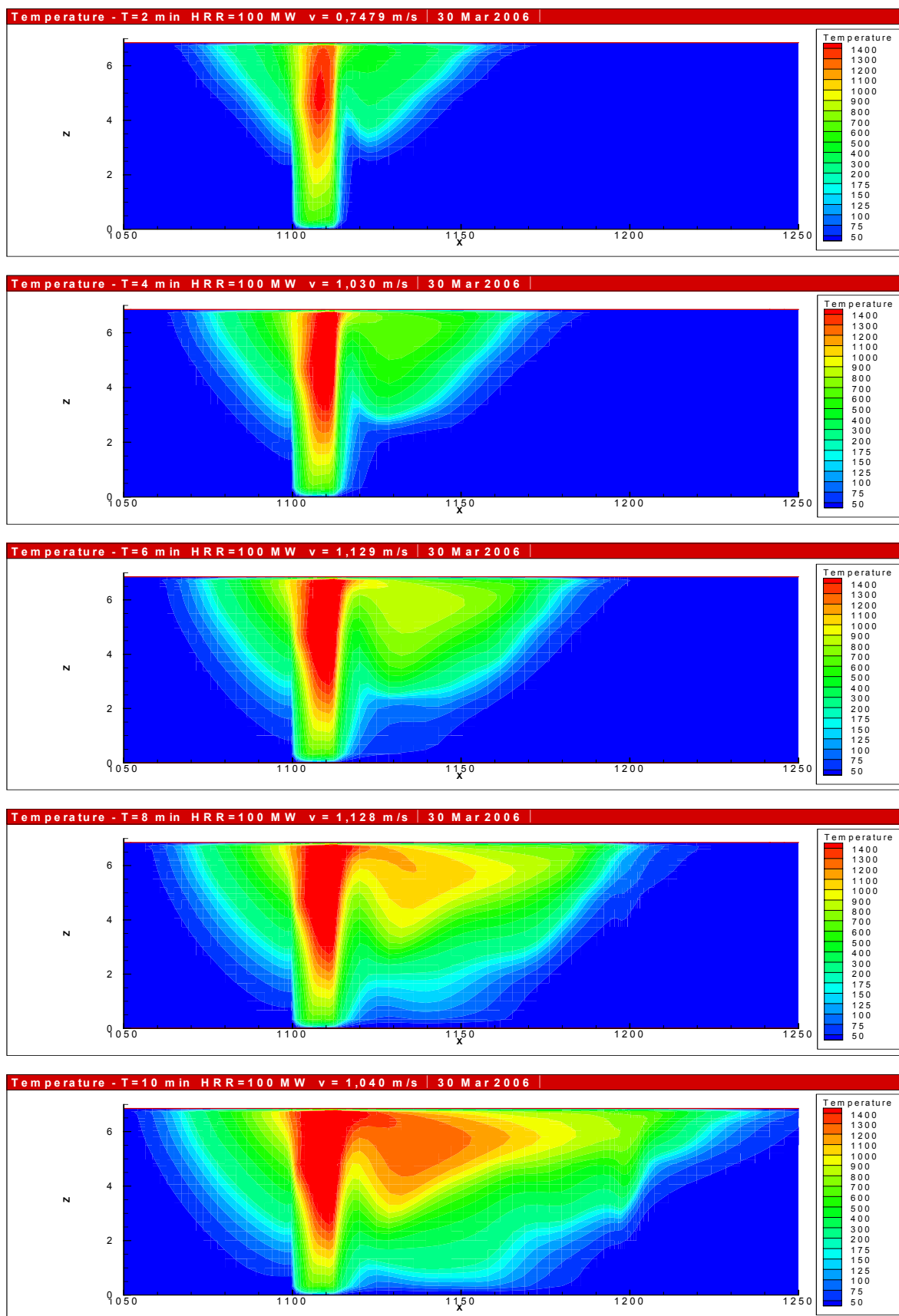
9.1.

PRILOG 1

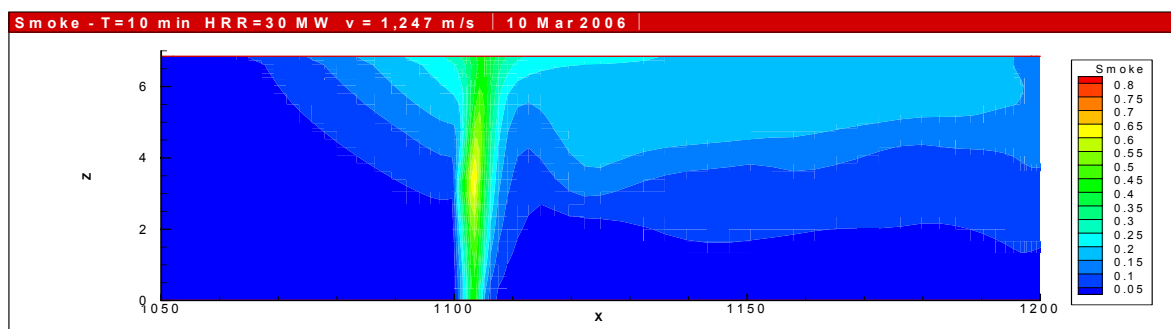
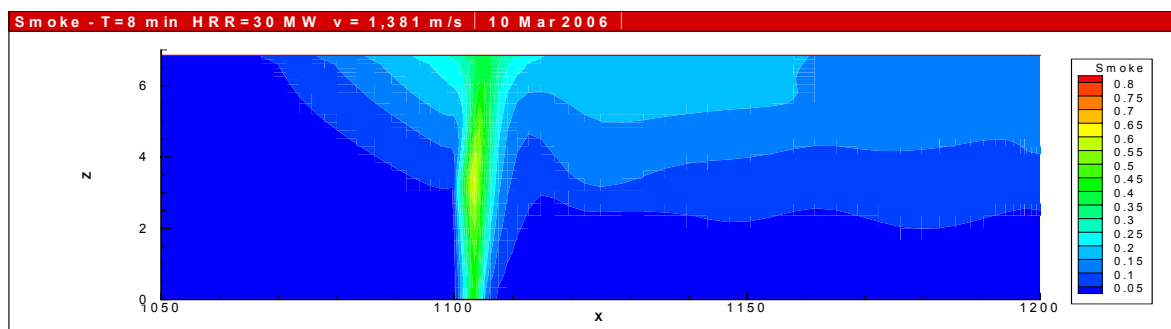
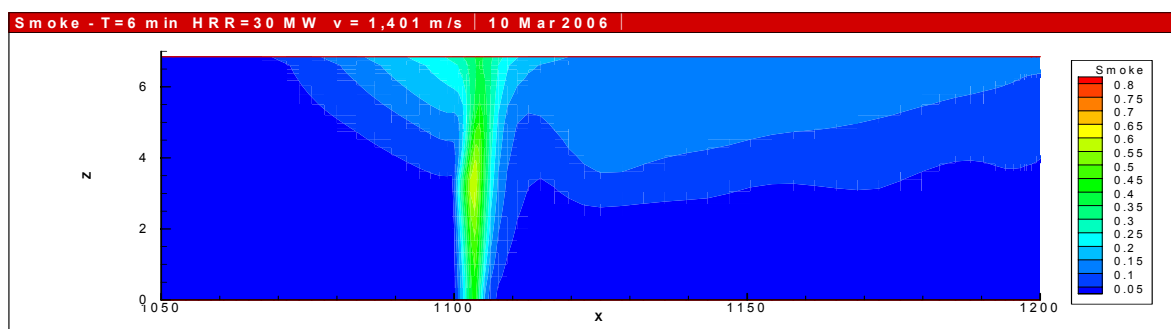
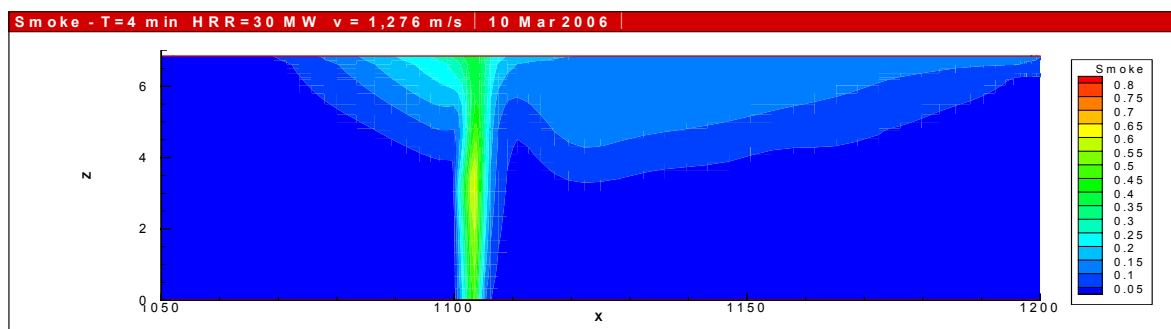
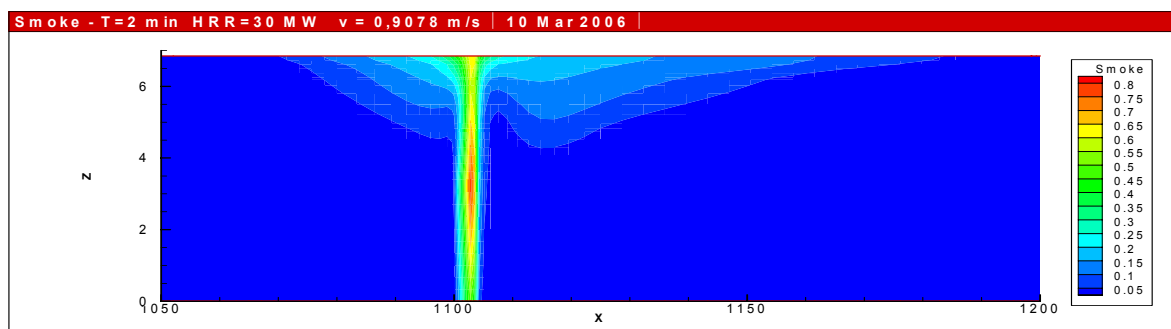
SIMULACIJA POŽARA MODELIRANJEM U CFD PROGRAMU "SOLVENT"[®]



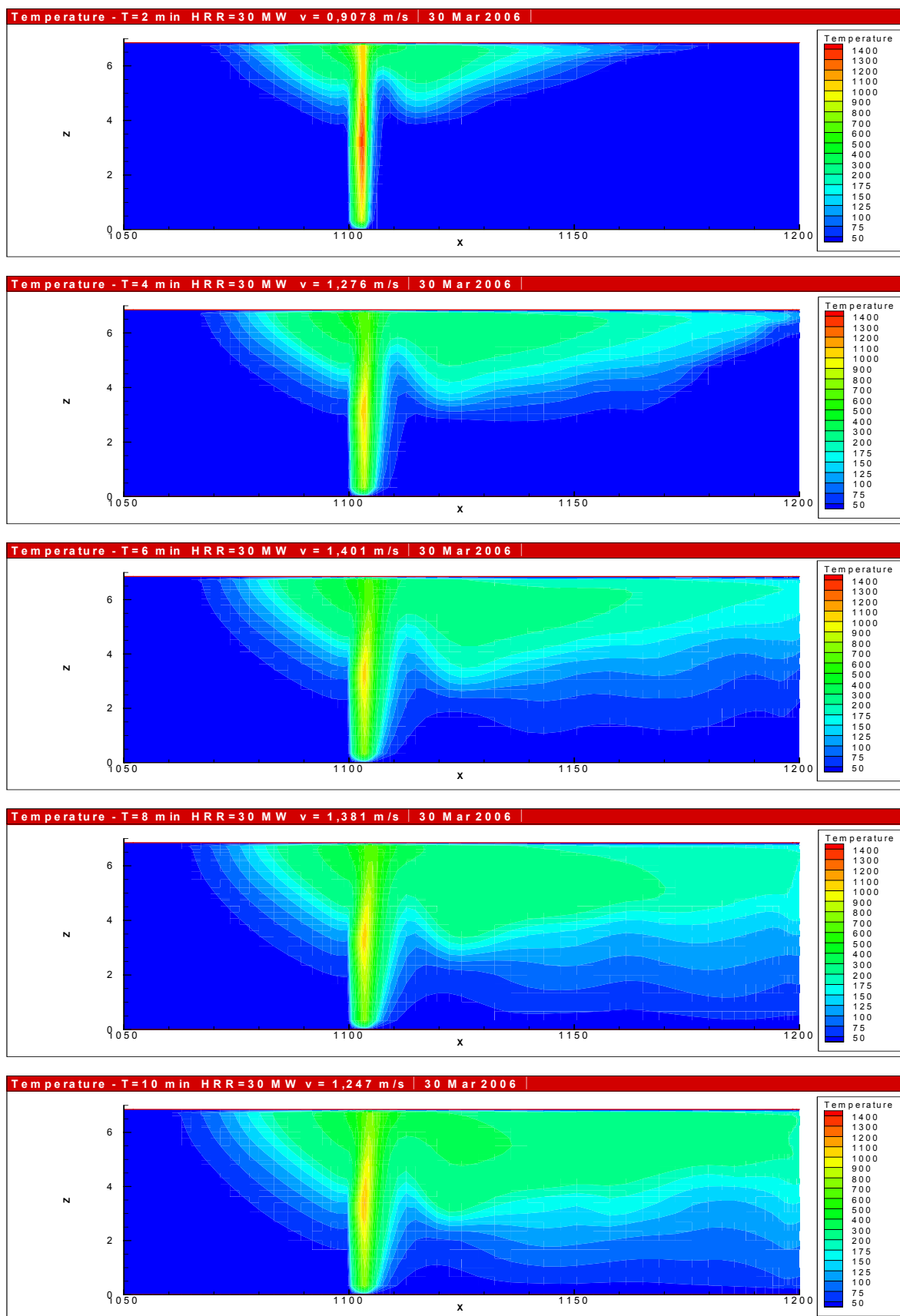
□ **Slika 43.** Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti stratifikacije



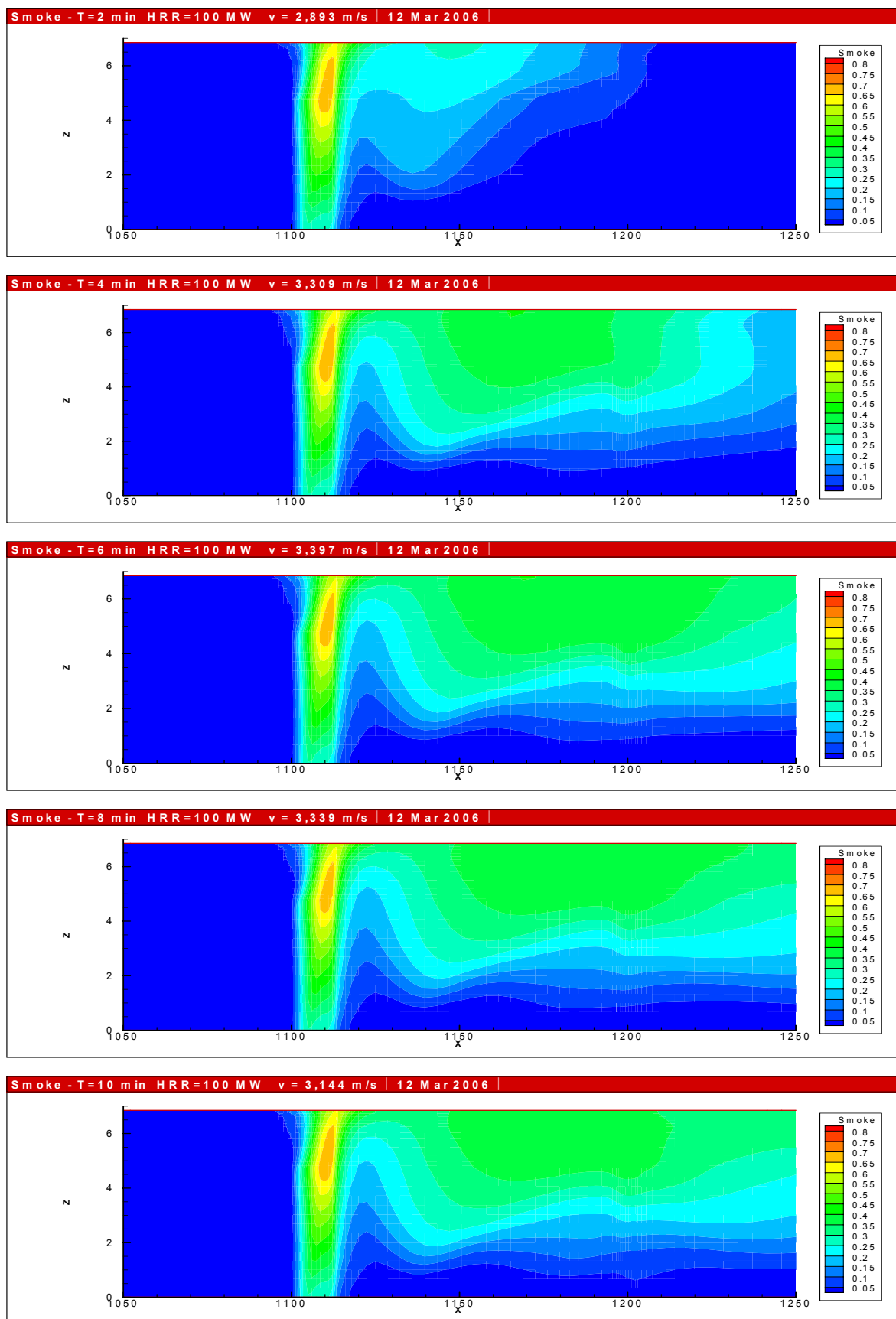
□ Slika 44. Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti stratifikacije



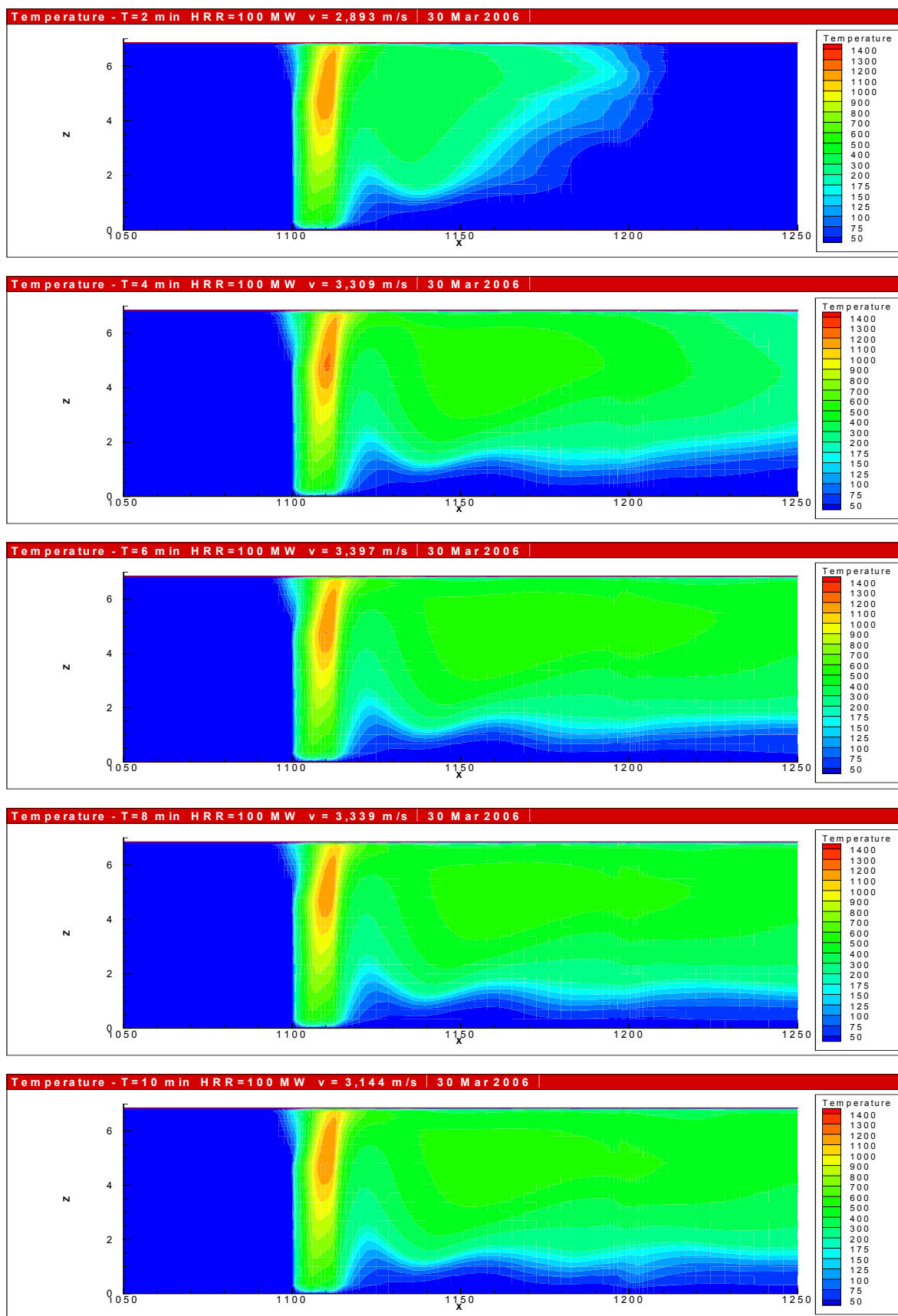
□ Slika 45. Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti stratifikacije



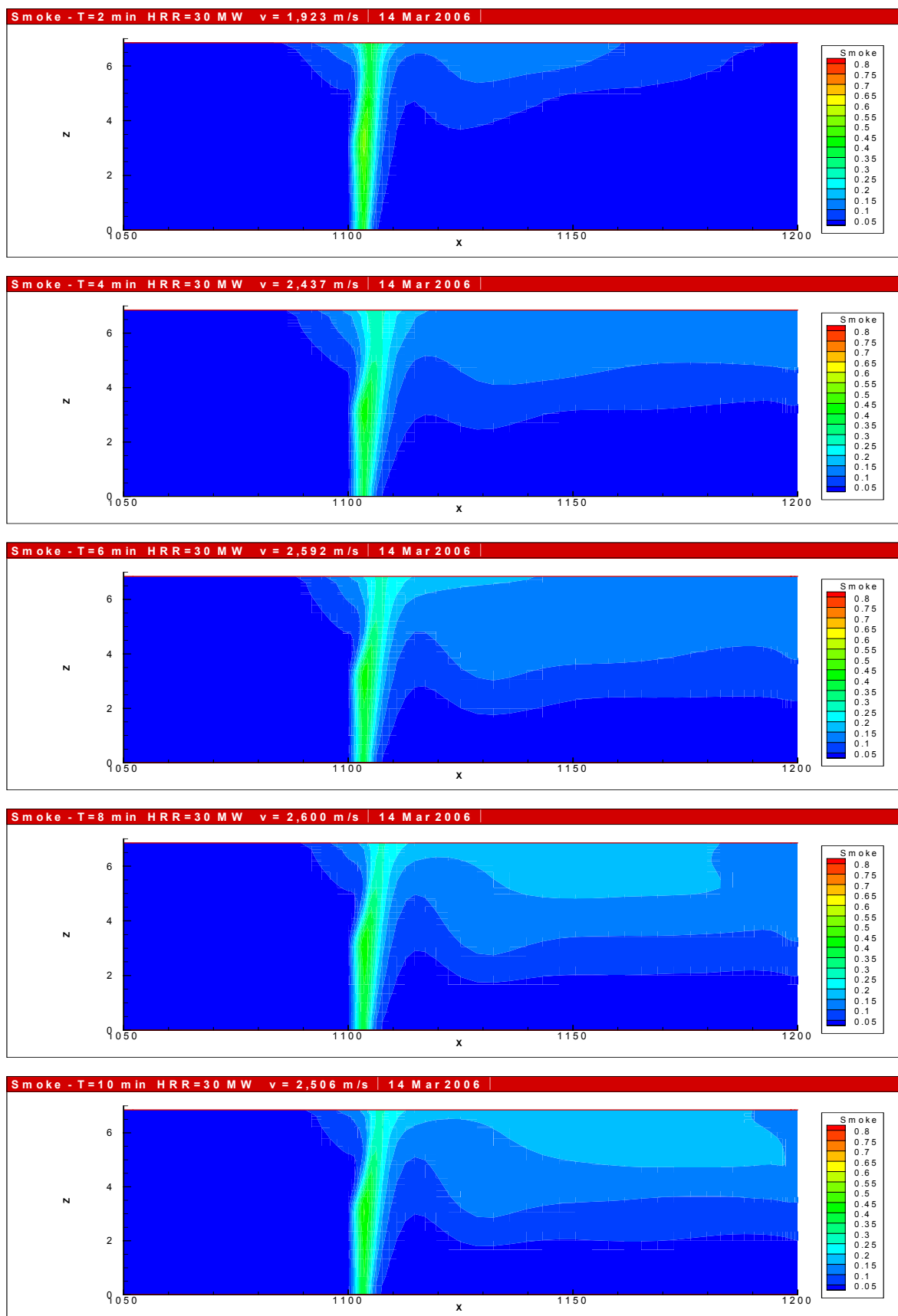
□ Slika 46. Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti stratifikacije



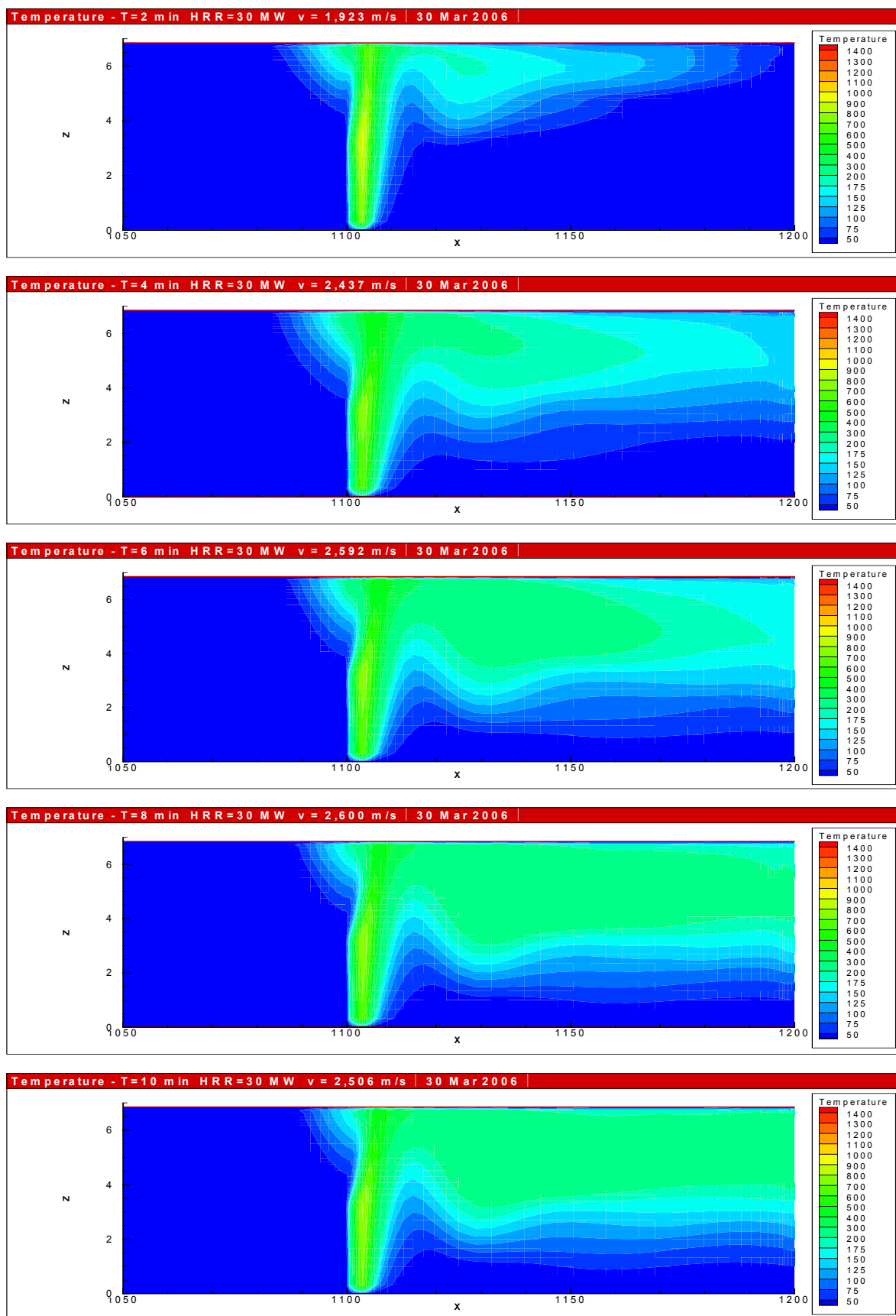
□ Slika 47. Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti odimljavanja



□ Slika 48. Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti odimljavanja



□ Slika 49. Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti odimljavanja



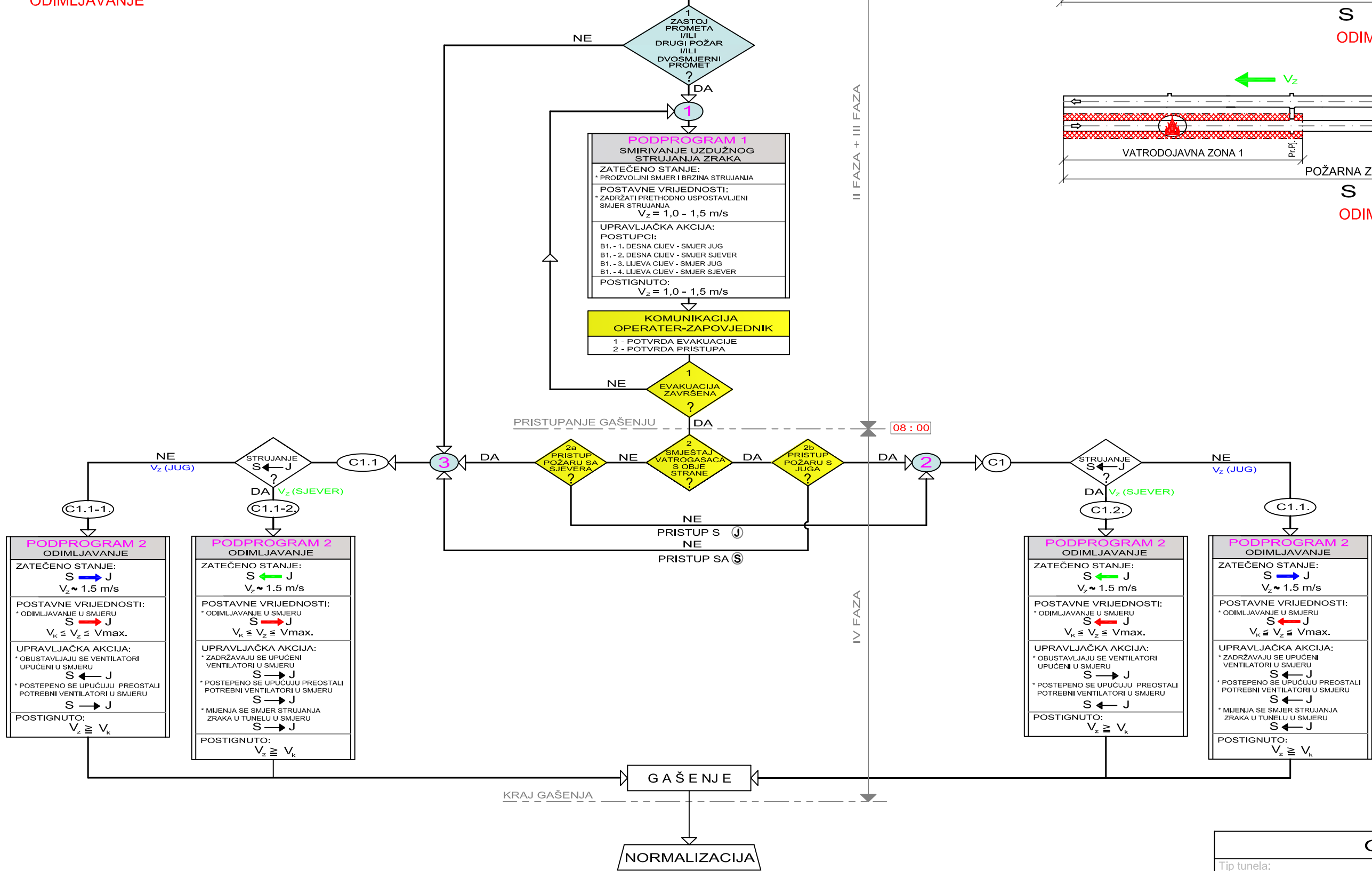
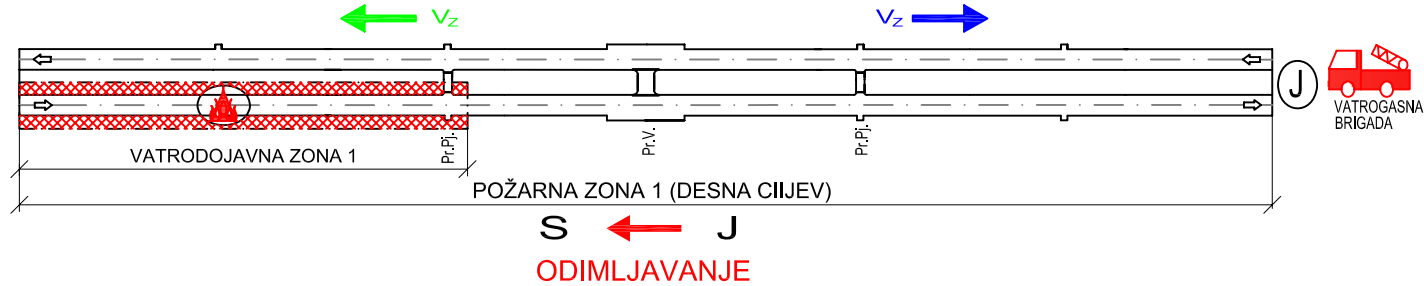
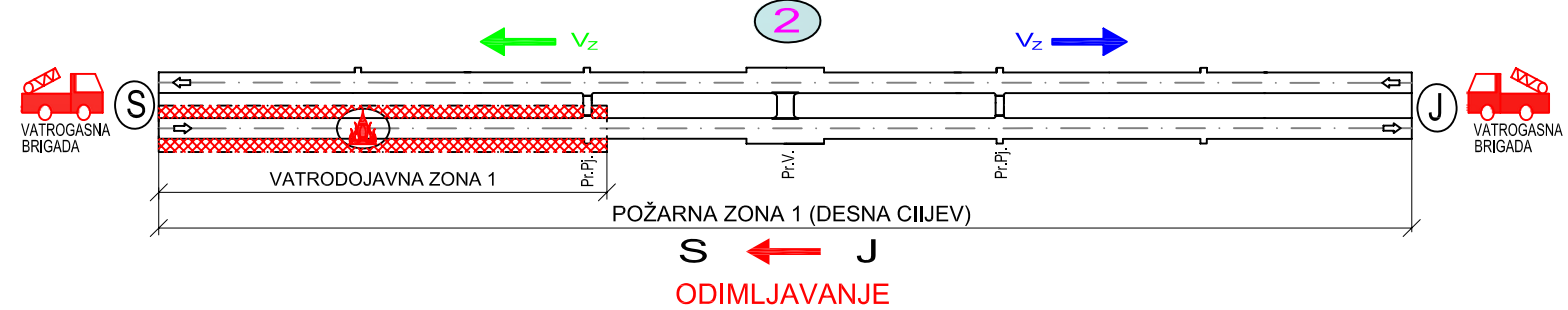
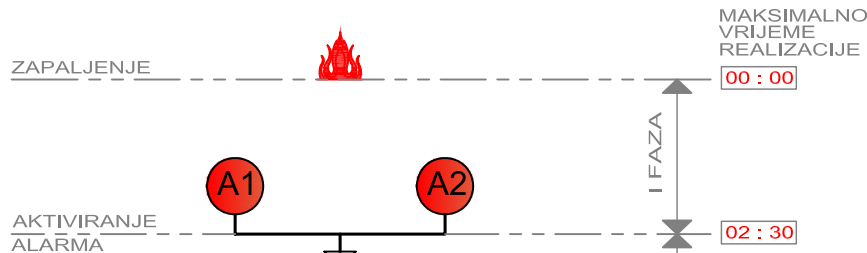
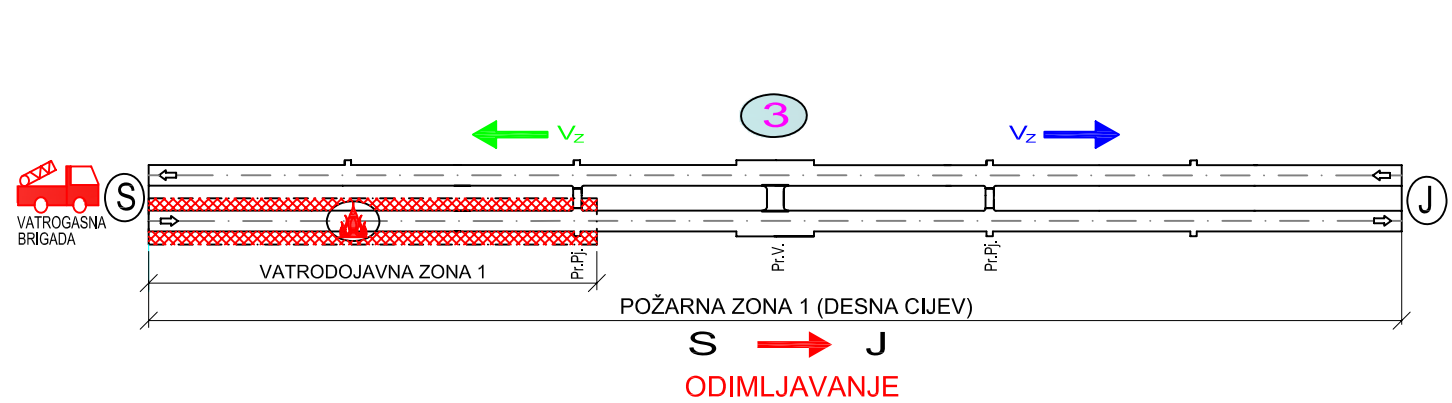
□ Slika 50. Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti odimljavanja

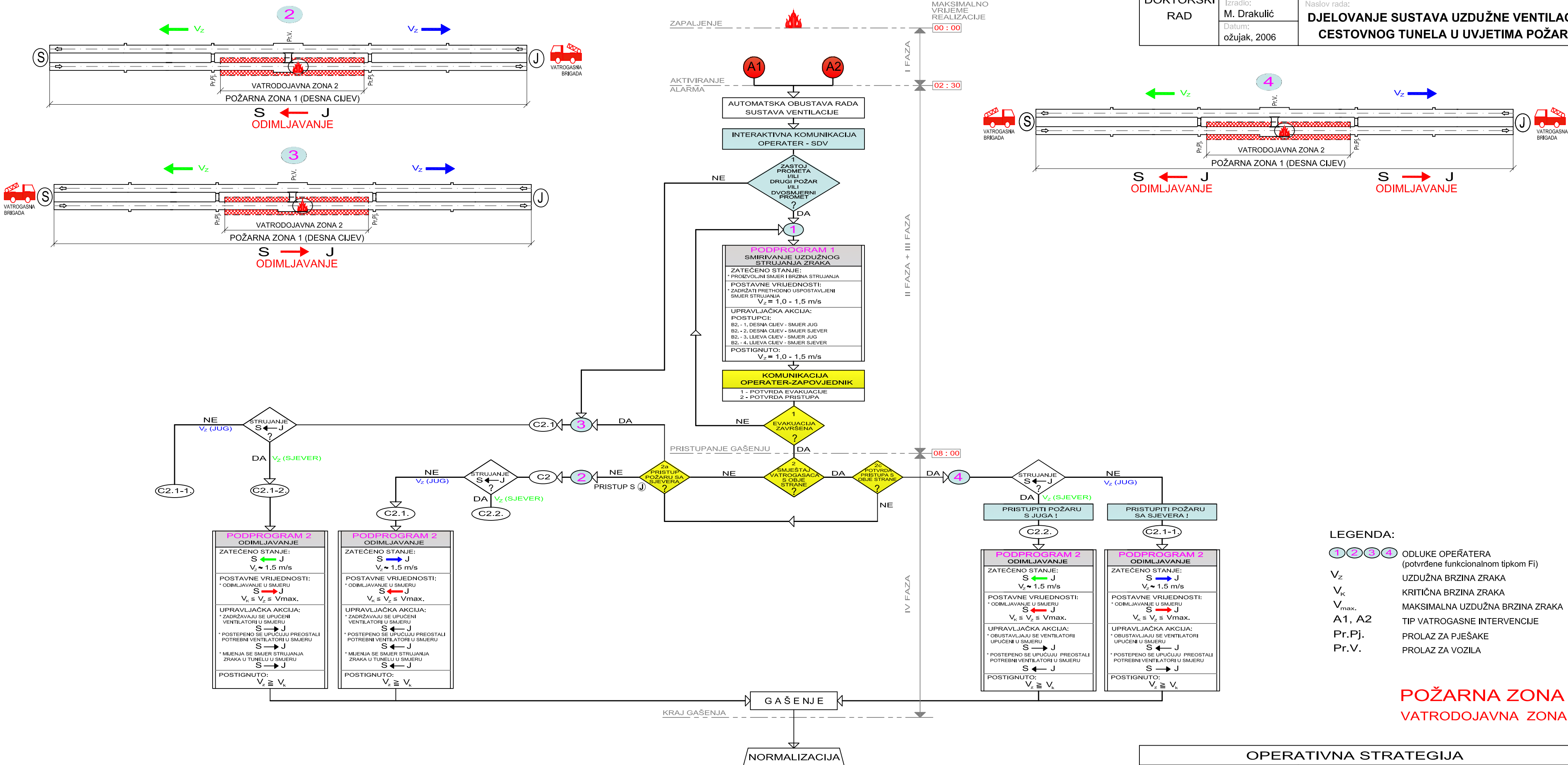
9.2.

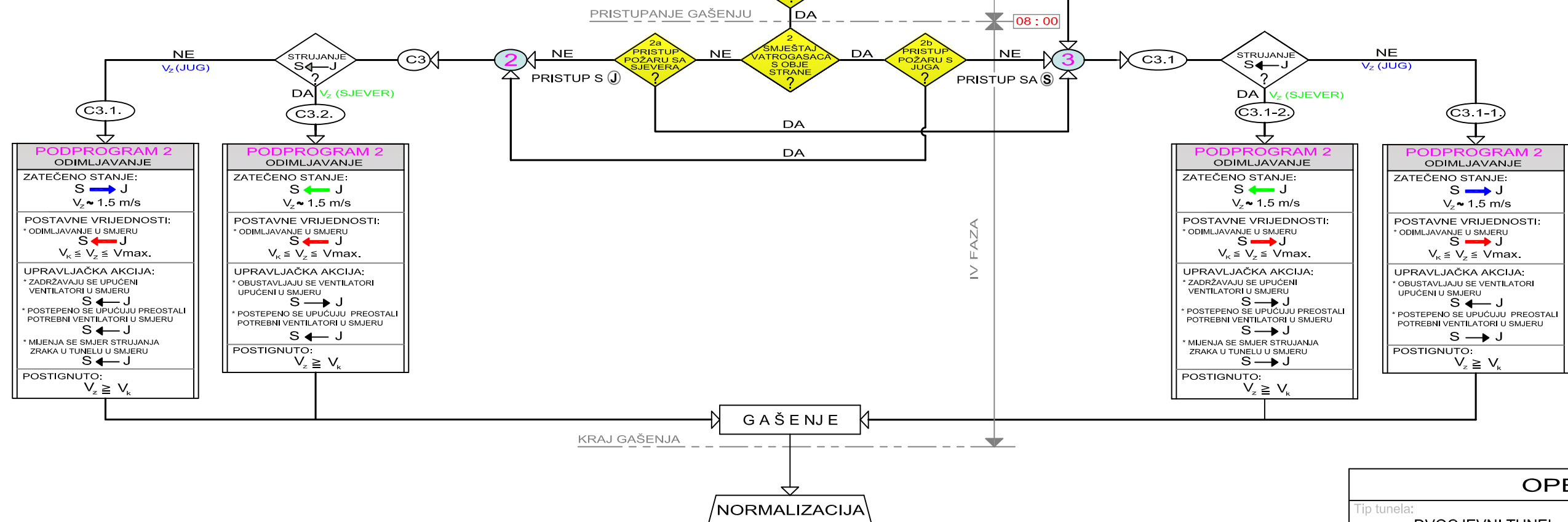
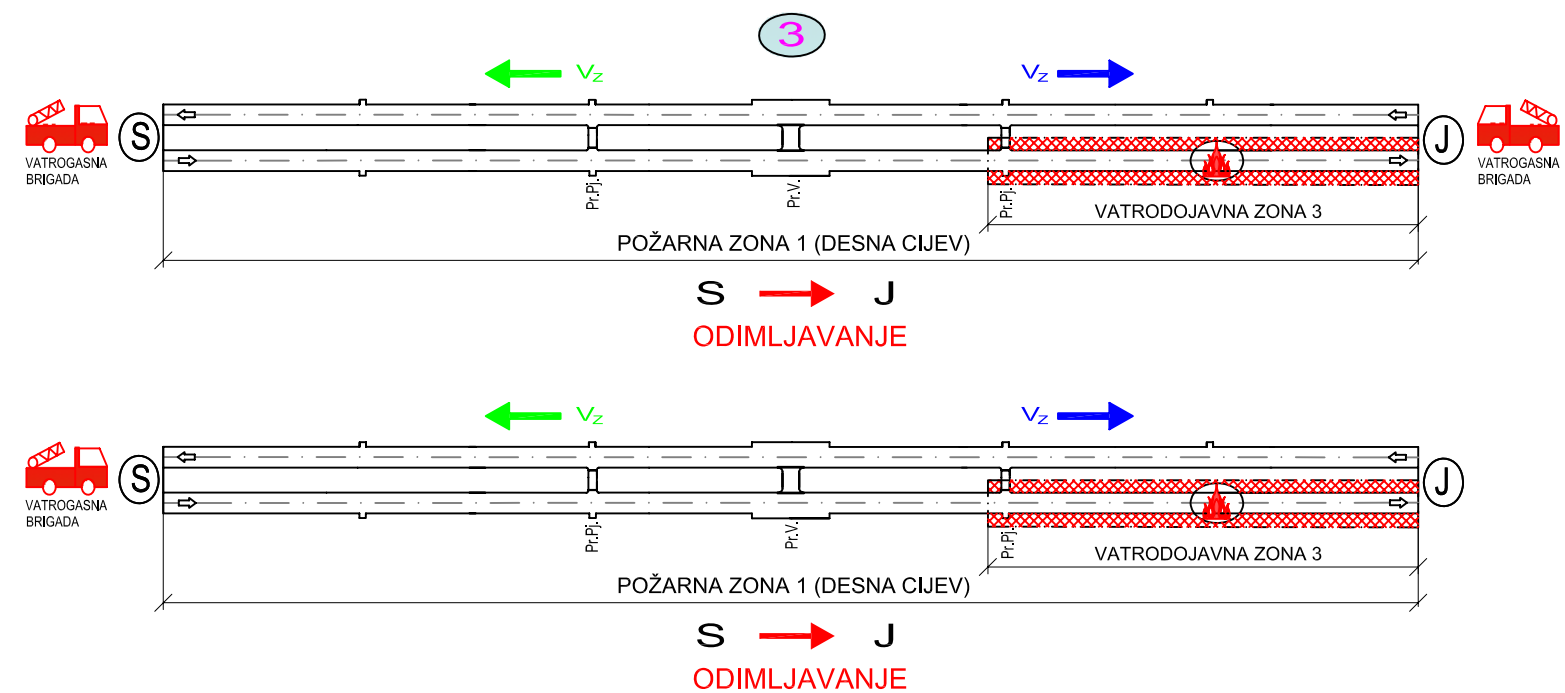
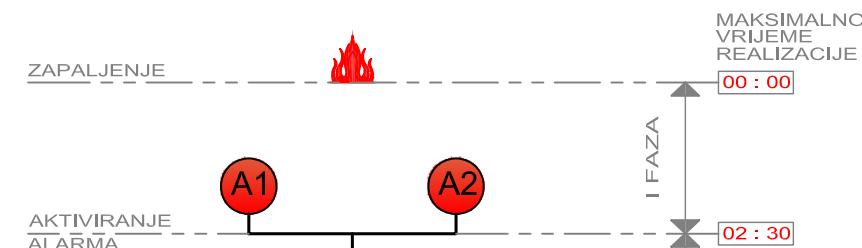
PRILOG 2

GENERIČKI ALGORITMI UPRAVLJANJA

(str. 1/6, 2/6, 3/6, 4/6, 5/6, 6/6)







LEGENDA:

- | | | | |
|------------|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | ODLUKE OPERATERA
(potvrđene funkcionalnom tipkom Fi) |
| V_z | | | UZDUŽNA BRZINA ZRAKA |
| V_K | | | KRITIČNA BRZINA ZRAKA |
| $V_{max.}$ | | | MAKSIMALNA UZDUŽNA BRZINA ZRAKA |
| A1, A2 | | | TIP VATROGASNE INTERVENCIJE |
| Pr.Pj. | | | PROLAZ ZA PJEŠAKE |
| Pr.V. | | | PROLAZ ZA VOZILA |

POŽARNA ZONA 1
VATRODOJAVNA ZONA 3

OPERATIVNA STRATEGIJA

Tip tunela: DVOCJEVNI TUNEL BROJ VATRODOJAVNIH ZONA : 6	Naziv: GENERIČKI ALGORITAM UPRAVLJANJA SUSTAVOM VENTILACIJE U UVJETIMA POŽARA	Str. 3/6
---	---	-------------



LITERATURA

1. *Strategija razvitka cestovne mreže u Hrvatskoj*, Vlada RH, 1996.
2. Bjegovic, D.; Planinc, R.; Carevic, M.; Stipanovic, I.; Planinc, M.; Zuljevic, M.: *Composite fire-resistant tunnel segments*, 3rd International Conference Tunnel Fires, Washington DC, USA, 2001.
3. Wetzig, V.: *Destruction Mechanisms in Concrete Material*, Tunnel Management, Vol. 5, No. 1, (41÷46), 2002.
4. Chow, W. K.: *On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, (271÷275), 1998.
5. Hu, L.H.; Huo, R.; Peng, W.; Chow, W.K.; Yang, R.X.: *On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires*, Tunnelling and Underground Space Technology, Elsevier Ltd., 2005.
6. Abanto, J.; Reggio, M.; Barrero D.; Petro, E.: *Prediction of fire and smoke propagation in an underwater tunnel*, Tunnelling and Underground Space Technology, Elsevier Ltd., 2006.
7. Jacques, E.; Possoz, L.: *Designing an expert system to control tunnel ventilation based on directly measured traffic characteristics*, 10th International Symposium on "Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels", Boston, USA.
8. *Report of the Task Forces for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in Mont Blanc Vehicular Tunnel*, France, 1999.
9. Leitner, A.: *The fire catastrophe in the Tauern Tunnel: experience and conclusion for the Austrian guidelines*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16 (217÷223), 2001.
10. Vukić, Z.; Kuljača, Lj.: *Automatsko upravljanje - analiza linearnih sustava*, ISBN 953-6970-01-5, Kigen, Zagreb, 2005.
11. Bendelius, A.G.: *Tunnel fire and life safety within the world road association (PIARC)*, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, Sydney, 2002.
12. Mashimo, H.: *State of the road tunnel safety technology in Japan*, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, Sydney, 2002.
13. ITA Working Group 4 Report: *Fire and Life safety for Underground Facilities*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, (217÷269), 1998.
14. Kim, J.Y.; Yoon, S.W.; Yoo, J.O.; Seo, T.B.; Rie, D.H.: *A Study on the Smoke Control Characteristic of Longitudinally Ventilated Tunnel Fire Using PIV (Particle Image Velocimetry)*, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 21, Issues 3-4, 2006.

15. Vaquelin, O.; Telle, D.: *Definition and experimental evaluation of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires*, Fire Safety Journal 40, (320÷330), 2005.
16. Sambolek, M.: *Model testing of road tunnel ventilation in normal traffic conditions*, Engineering structures, Vol. 26, No. 12, (1705÷1711), 2004.
17. Sambolek, M.; Čizmek, M.: *Modelsko ispitivanje ventilacije tunela Sveti Rok*, Završno izvješće, Brodarski institut, Zagreb, 1998.
18. Drakulić, M.: *Analiza modelskih ispitivanja sustava ventilacije prometnih tunela*, Magistarski rad, FSB Zagreb, 2000.
19. Yan, Z.; Zhu, H.; Yang, Q.: *Large-scaled Fire Testing for Long-sized Road Tunnel*, Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2006.
20. *Schlussbericht der Versuche im Ofenegg Tunnel*, Kommission für Sicherheits massnahmen in Strassentunneln, Swiss, 1965.
21. Pucher, K.: *Fire Tests in the Zwenberg Tunnel (Austria)*, International conference on fires in tunnels, Borås, Sweden, 1994.
22. *State of the Road Tunnel Equipment in Japan-Ventilation, Lighting, Safety Equipment*, Public Works Research Institute, Technical note, Vol. 61, 1993.
23. *Fires in Transport Tunnels*, Report on Full Scale Tests, EUREKA-Project EU499: FIRETUN, Germany, 1995.
24. Lönnermark, A.; Ingason, H.: *Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in Tunnels*, Fire Safety Journal, Vol. 40 (506÷527), 2005.
25. Luchian, S.F.: *The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*, 2nd International Symposium Tunnel Safety & Security (ISTSS), (49÷55), Madrid, 2006.
26. Modic, J.: *Požarni režim v predoru Kastelec 1*, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za ogrevalno, sanitarno in solarno tehniko, Ljubljana, Slovenia, 2006. [COBISS.SI-ID [9034779](#)]
27. Vidmar, P.; Petelin, S.: *Analysis of heat transfer and fluid movement in case of fire in a road tunnel*, International Thermal Science Seminar, Bled, Slovenia, 2004.
28. Li, S.M. Jojo; Chow, W. K.: *Numerical studies of performance evaluation of tunnel ventilation safety systems*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, (435÷452), 2003.
29. Grant, G. B.; Jagger, S. F.; Lea, C. J.: *Fires in tunnels*, ISSN 1364-503X, Vol. 356, No. 1748, (2873÷2906), The Royal Society Publishing, 1998.
30. Casale, E.; Biollay, H.: *A fully-controlled ventilation response during a tunnel fire*, International Tunnel Management, Vol. 4, Issue 3, (26÷30), 2001./2002.

31. Bradbury, W.M.S.: *Mont Blanc tunnel fire: alternative ventilation configuration simulations*, International Tunnel Management, Vol. 5, No 2, (26÷31), 2002.
32. Guigas, X.; Weatherill, A.; Trottet, Y.: *The new ventilation systems of the Mont Blanc tunnel*, "Bonnard and Gardel Consulting Engineers", Switzerland & E. Casale, "Scetauroute", France (rad preuzet posredno, nije poznata godina objavljivanja).
33. Modic, J.: *Fire simulation in road tunnels*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, (525÷530), 2003.
34. Carvel, R.O.: *Fire size in tunnels*, PhD thesis, Heriot-Watt University, Edinburgh, 2004.
35. Carvel, R.O.; Beard, A.N.; Jowitt, P.W.: *The influence of longitudinal ventilation systems on fires in tunnels*, Tunnelling and Underground Space Technology 16, (3÷21), 2001.
36. Petelin, S. i grupa autora: *Uspešnost intervencije v predorih*, Fakulteta za pomorstvo in promet, Univerzitetu v Ljubljani, Portorož, 2005.
37. Hartman, P.; Huijben, H.: *Tunnel Ventilation and Safety in Escape Routes*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, Issues 3-4, 2006.
38. Jacques, E.: *Controlling fire and smoke movements in road tunnels by means of ventilation: state of the art*, Mine Ventilation, Taylor & Francis Group, ISBN 90-5809-633-5, (211÷217), London, 2004.
39. Jacques, E.: *Controlling fire and smoke movements by active ventilation-a dream or the near future?* Université Catholique de Louvain, Belgium (preuzeto izravno od autora).
40. Breklemans, J.: *Tunnel safety-related research projects and networks funded by the European Commission*, 22nd PIARC World Congress, 2003.
41. www.dartsproject.net
42. www.uptun.net
43. www.sirtakiproject.net
44. www.crfproject-eu.org
45. www.virtualfires.org
46. Economic Commission for Europe (UNECE): *Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels*, Final Report, Ženeva, Švicarska, 2001.
47. Innovative Research: *User's Manual SOLVENT*, Version 1.0, Innovative Research, Inc., Parsons Brinckerhoff, USA, 2000.
48. *Dossier Pilote des Tunnels Équipements Section 4.1 – Ventilation*, Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), ISBN 2-11-084740-9, (22÷23), Lyon, Francuska, 2003.

49. Reiss, I.; Bettelini, M.: *The prediction of smoke propagation due to tunnel fires*, ITC Conference Tunnel Fires and Escape from Tunnels, Lyon, 1999.
50. PIARC Technical Committee C-5 Tunnel Operations: *Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, Proposed Publication, 2003.
51. Carlsson, J.: *Fire Modeling using CFD*, Lund University, Report 5025, Švedska, 1999.
52. Reiss, I.; Bettelini, M.; Brandt, R.: *Sprint - a design tool for fire ventilation*, 10th Int. Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Boston, 2000.
53. Fanneløp, T.K.: *Fluid Mechanics for Industrial Safety and Environmental Protection*, Industrial Safety Series Vol. 3, Elsevier Ltd., 1994.
54. Müller, J.: *On the Influence of Slopes on Gravity-Driven Currents*, PhD thesis No. 12017, ETH Zürich, 1997.
55. PIARC Committee on Road Tunnels (C5): *Fire and Smoke Control in Road Tunnels* ISBN 2-84060-064-1 (ref.05.05.B), www.piarc.lcpc.fr, 1999.
56. Grupa autora: *Handboek Toegankelijkheid*, Elsevier Doetinchem, 2002.
57. *Načrt zaštite in reševanja ob nesrečah v predorih Jasovnik in Ločica*, DARS d.d. PE Varansko, Osnutek, 2004.
58. www.a86ouest.com
59. Danziger, N.H.; Kennedy, W.D.: *Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels*, 4th International Symposium „Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels“, 1982.
60. Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration: *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program*, Test Report, Boston (Massachusetts), USA, 1995.
61. Oka, Y.; Atkinson G. T.: *Control of Smoke Flow in Tunnels Fires*, Fire Safety Journal 25 (305÷323), 1995.
62. Wu, Y; Bakar, M.Z.A.: *Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity*, Fire Safety Journal 35 (363÷390), www.elsevier.com/locate/firesaf, 2000.
63. PIARC Committee on Road Tunnels (C5): *Road Tunnels: Report of the Committee*, ISBN 2-84060-015-3 (ref. 20.05.B), 20th World Road Congress, Montreal, 1995.
64. Kunsch, J.P.: *Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnels*, Fire Safety Journal 37 (67÷81), 2002.
65. Lundin, J.: *Uncertainty in smoke transport models*, Lund University, Institute of Technology, Report 3086, Sweden, 1997.

66. Frantzich, H.: *Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering*, Lund University, Institute of Technology, ISSN 1102-8246, Sweden, 1998.
67. Hajduković, M.: *Požarna varnost cestovnih predorih*, Časopis Požar br.1, Ljubljana, 1997.
68. European Thematic Network „Fire in Tunnels“ (FIT): *Fire Safe Design, Road Tunnels*, Niels Peter Hoj, WP3 Report, Chapters 3, 4, 2003. (www.etnfit.net/index.html)
69. EU - European Parliament and the Council: *Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network*, Brussels, 2004.
70. EU - Directorate General for Energy and Transport: *Proposal for a Directive on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network*, Brussels, 2002.
71. Österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV): *Project guidelines RVS 9.261 – Ventilation Equipment, Basic Principles*, Vienna, 2001.
72. Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen: *Richtlinien für the ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln RABT*, 2003.
73. Ingason, H.; Lönnemark, A.: *Project description and planning of large scale tests in Runehamar tunnel* SP, Swedish National Testing and Research Institute, Stockholm, Sweden, 2003.
74. Persson M.: *Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel*, Lund University, Report 5096, Sweden, 2002.
75. Drakulic, M.: *Security technologies in long road tunnels to counter potential terrorist threats*, NATO Science for Piece, Project Proposal No. SST.EAP.SFP 981125, 2005.
76. EU Project UPTUN Task 3-3: *Tunnel operator*, 2004.
77. Federal Highway Administration (FHWA): *Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels*, Final Report, Washington D.C., 1979.
78. Bakarić, V; Abrashi, A; Drakulić, M.: *Ispitivanje sustava ventilacije tunela Mala Kapela*, Izvještaj o ispitivanju oznake D02-HBB01-000, reg.br. 9-3-824, Brodarski institut, Zagreb, 2005.
79. Bakarić, V; Abrashi, A; Drakulić, M.: *Ispitivanje sustava ventilacije tunela Brinje*, Izvještaj o ispitivanju oznake D06-HBB01-000, reg.br. 9-3-561, Brodarski institut, Zagreb, 2005.
80. Bakarić, V; Abrashi, A; Drakulić, M.: *Ispitivanje sustava ventilacije tunela Plasina*, Izvještaj o ispitivanju oznake D12-HBB01-000, reg.br. 9-3-562, Brodarski institut, Zagreb, 2005.
81. Österreichischen Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV): *Proposal Project guidelines RVS 9.261 – Ventilation Equipment, Basic Principles*, Vienna, Ver. 15-11-2005.

82. Šijak, T; Bakarić, V; Drakulić, M.: *Algoritam stabilizacije i kontrole uzdužnog strujanja zraka u uvjetima požara i redovnog pogona tunela Mala Kapela*, dokument oznake D02-BBB01-000, reg.br. 9-3-825, Brodarski institut, Zagreb, 2005.

POPIS GRAFIČKIH PRILOGA

SLIKE:

Broj	Naziv	str.
Slika 1.	Blok dijagram aktivnosti predviđenih u disertaciji	23
Slika 2.	Shema funkcionalne i tehnološke pozicije sustava upravljanja i nadzora tunelom	29
Slika 3.	Generiranje događaja u interakciji ključnih faktora eksploatacije tunela	30
Slika 4.a	Algoritam postupanja za slučaj signala sa vatrodojavnog senz. kabela I FAZA	32
Slika 4.b	Algoritam postupanja u slučaju pokretanja požarnog alarma br. 2 II FAZA	33
Slika 5.	Hijerarhija integriranog upravljanja prometnicom (autocestom) u cjelini	35
Slika 6.	Ključni faktori sigurnosti u cestovnom tunelu	36
Slika 7.	Lokacija požara za potrebe CFD simulacije	41
Slika 8.	Diskretizacija objekta modeliranja za potrebe CFD simulacije	42
Slika 9.	Stratifikacija dima i simetrična raspodjela u početnoj fazi požara	43
Slika 10.	Opći 1-D model širenja dima u fazi stratifikacije	45
Slika 11.	Širenje dima u vremensko – prostornom prikazu	48
Slika 12.	Brzina kretanja putnika pri evakuaciji u ovisnosti o nagibu kolnika	51
Slika 13.	Područje širenja dima u ovisnosti o uzdužnoj brzini zraka	52
Slika 14.	Evakuacija putnika pomoću okana u gradskom tunelu (istočni prilaz Parizu, A86)	52
Slika 15.	Odimljavanje kod različitih izvedbi sustava uzdužne ventilacije tunela	53
Slika 16.	Karakteristični slučajevi odimljavanja	55
Slika 17.	Karakteristični slučajevi odimljavanja u tunelu s nagibom	57
Slika 18.	Sustav za generiranje „hladnog“ dima i vizualizaciju inicijalne faze požara	62
Slika 19.	Hipotetski model povratnog strujanja dimnog sloja („backlayering“)	64
Slika 20.	Primjer eksperimentalno određenog visinskog profila temperature (rezultati „2-zonskog“ modela transporta dima)	65
Slika 21.	Vremenski segmenti evakuacije u ovisnosti o razvoju požara	71
Slika 22.	Opća vremenska rasčlana požarnog incidenta	72
Slika 23.	Vremenska ovisnost maksimalnih temperatura pri požaru autobusa	72
Slika 24.	Pregled postojećih i planiranih tunela unutar cestovne mreže TEN-a	75
Slika 25.	Vremenska funkcija rasta toplinske snage požara (HRR) za različite tipove vozila	82
Slika 26.	Stanje prometa prije pojave požara	85
Slika 27.a	Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima tekućeg prometa	85

Broj	Naziv	str.
Slika 27.b	Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima zastoja/zagušenja prometa	86
Slika 28.	Stanje prometa prije pojave požara	88
Slika 29.a	Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima tekućeg prometa	88
Slika 29.b.	Stanje neposredno nakon pojave požara u uvjetima zastoja/zagušenja <i>prometa</i>	89
Slika 30.	Stanje prometa prije pojave požara	91
Slika 31.	Stanje neposredno nakon pojave požara	91
Slika 32.	Shematski prikaz kognitivnog modela opterećenja operatera	98
Slika 33.	Grananje dijagrama toka u „osno simetričnu“ strukturu	107
Slika 34.	Blok shema algoritma kontrole uzdužnog strujanja zraka u tunelu	118
Slika 35.	Blok dijagram simulacijskog modela upravljanja uzdužnom brzinom zračne struje	124
Slika 36.	Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0=3$ m/s	129
Slika 37.	Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0=4$ m/s	129
Slika 38.	Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0=5$ m/s	130
Slika 39.	Dijagram umirivanja i stabilizacije zračne struje za $u_0=6$ m/s	130
Slika 40.	Prikaz parametara sustava ventilacije tunela <i>Sveti Rok</i> pod djelovanjem bure	131
Slika 41.	Shematski prikaz rasporeda ventilatora i kombiniranih senzora brzine/smjera strujanja (primjer tunela Mala Kapela)	133
Slika 42.	Izmjerena brzina zračne struje u 7 senzora (gore) i odstupanja mjerenja pojedinih senzora od srednje vrijednosti mjerenja (dolje)	134
Slika 43.	Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti stratifikacije	141
Slika 44.	Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti stratifikacije	142
Slika 45.	Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti stratifikacije	143
Slika 46.	Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti stratifikacije	144
Slika 47.	Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti odimljavanja	145
Slika 48.	Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 100 MW, uvjeti odimljavanja	146
Slika 49.	Prikaz raspodjele koncentracija dima za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti odimljavanja	147
Slika 50.	Prikaz raspodjele temperatura za požar toplinske snage 30 MW, uvjeti odimljavanja	148

TABLICE:

Broj	Naziv	str.
Tablica 1.	Požari u cestovnim tunelima (izbor autora, različiti izvori)	15
Tablica 2.	Prikaz sustava (opreme) koji aktivno participiraju u operativnoj strategiji rada sustava ventilacije za slučaj redovnog pogona i požarnog incidenta	38
Tablica 3.	Ulazni podaci i rezultati određivanja kritične brzine na modelu i u naravi za slučaj tunela Sv. Rok	58
Tablica 4.	Standardizirane vrijednosti požarnih parametara prema PIARC-u	63
Tablica 5.	Faze požarnog incidenta i optimalne forme razvoja i širenja dima	73
Tablica 6.	Pregled raspoloživih nacionalnih regulativa i smjernica	76
Tablica 7.	Usporedba zahtjeva u pogledu rada uzdužne ventilacije za slučaj požara	77
Tablica 8.	Kritične brzine zraka pri odimljavanju prema RABT	78
Tablica 9.	Preporuke PIARC-a za rad sustava uzdužne ventilacije za slučaj požara	79
Tablica 10.	Usporedbene karakteristike požara za različite vrste vozila	80
Tablica 11.	Maksimalna vremena realizacije aktivnosti karakt. za pojedine faze požara	106
Tablica 12.	Ovisnost gustoće zraka o temperaturi	112
Tablica 13.	Parametri algoritma kontrole uzdužnog strujanja zraka u cestovnom tunelu	119
Tablica 14.	Izračun integrala „I“ brzine zračne struje u_0	128
Tablica 15.	Legenda boja za kombinirane senzore brzine i smjera strujanja	134

FOTOGRAFIJE:

Broj	Naziv	str.
Foto 1:	Razvoj dima i simetrično grananje u zoni stratifikacije	44
Foto 2:	Izraženo stratifikacijsko širenje dima u jednom smjeru (lijeva grana)	44
Foto 3:	Pogled na tunel prije startanja požarnog testa – pripreme, $u_z = 4,0 \text{ m/s}$	49
Foto 4:	Startanje požarnog testa, $u_z = 3,9 \text{ m/s} \rightarrow$ zadimljenje poprečnog presjeka	49
Foto 5:	Ponovno uspostavljanje stratifikacije dima, $u_z \leq 1,5 \text{ m/s} \rightarrow$ „slobodna zona“	49
Foto 6:	Gener. dima neposredno nakon zapaljenja gorive smjese, $u_z = 0 \div 0,5 \text{ m/s}$	50
Foto 7:	Razvoj stratifikacije dima u početnoj fazi požarnog testa, $u_z = 0,7 \text{ m/s}$	50
Foto 8:	Prikaz procesa odimljavanja	55
Foto 9:	Distribucija dima u slučaju asimetričnog profila uzdužne brzine ($u_c = V_f$)	59
Foto 10:	Prikaz širenja dima ostvaren prilikom neizotermnih modelskih ispitivanja	60
Foto 11:	Prikaz povratnog slojevitog širenja dima prilikom izotermnih model. ispitivanja	61

KRATKI ŽIVOTOPIS

Rođen sam 17.09.1958. godine u Skopju. Sve faze školovanja, od osnovne škole, preko gimnazije do fakulteta pohađao sam u Zagrebu. *Fakultet strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu završavam 1983. godine na odsjeku strojarstva, termotehnički smjer. Nadalje, magistrirao sam 15.04.2000. godine na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* u Zagrebu, s temom rada „*Analiza modelskih ispitivanja sustava ventilacije prometnih tunela*“.

Radni odnos zasnivam 1984. godine u sastavu *Investitorske grupe* za izgradnju *Nove vojne bolnice* u Zagrebu (sadašnje *Kliničke bolnice Dubrava*). U okviru spomenute grupe radim na poslovima nadzora nad izgradnjom termotehničkih postrojenja i instalacija.

Od 1987. godine radim u *Brodarskom institutu* u Zagrebu, gdje sam prošao sve faze istraživačkog, razvojnog i projektnog rada, od istraživača suradnika do vodećeg projektanta/istraživača. Područje mog rada obuhvaća razvoj i aplikaciju termotehničkih postrojenja, što uključuje izradu svih faza tehničke dokumentacije, sudjelovanje u naučno-istraživačkim projektima, modelska i prototipna ispitivanja, kao i terenska mjerenja. Sudjelovao sam u mnogim projektima i programima kao suradnik ili voditelj projekta, a kao primjere navodim *Projekt hlađenja ispušnih plinova brodskih diesel motora*, *Projekt hlađenja protubrodskog raketnog sustava RBS-15B*, *Projekte ventilacije tunela Mala Kapela*, *Sveti Rok*, *Grič*, *Brinje*, te niz drugih tunela u Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i Crnoj Gori, koji su u gradnji ili u pripremljivoj fazi. U periodu 2002. - 2004. sudjelovao sam u EUREKA projektu „*Factory Fire Tunnel*“ (E! 2823), kojeg je vodio Građevinski fakultet u Zagrebu. Trenutno sudjelujem u sveobuhvatnim istraživanjima *Zaštite od bure na dionici AC Sveti Rok – Posedarje*, *Studiji izvodljivosti izgradnje tunela kroz Medvednicu*, te u nizu drugih projekata iz područja tunelogradnje i cestovne infrastrukture.

Pored gore navedenog, stalni sam sudski vještak za strojarstvo *Županijskog suda u Zagrebu* i član *Hrvatskog društva sudskih vještaka*. Također, predstavnik sam Hrvatske u Međunarodnoj organizaciji za ceste (PIARC), u ekspertnoj grupi za cestovne tunele, iz područja „*Fire and Smoke Control*“.

SHORT BIOGRAPHY

I was born in Skopje on September 17th 1958. I spent my entire academic career in Zagreb graduating in 1983 from the *Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture*, at the Mechanical Engineering Department with a major in thermo dynamics. On April 15th 2000, I further received a master's degree from the *Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture*, with a thesis titled "*Model Testing Analysis of Road Tunnel Ventilation Systems*".

After graduation, I joined in 1984 the *Investor Group* which was in the process of building the *New Military Hospital* (the current name: *Clinical Hospital Dubrava*). As an executive engineering supervisor, my duties included the supervision of the construction of thermal plants and installations.

Since 1987 I have been working at *Brodarski institute* in Zagreb, where I passed through all phases of research, development and design, starting as a researcher and currently working as a project leader/researcher. My activities are mainly in areas of development and application of thermal plants, including creation of all levels of technical documentation, participating in scientific projects as well as model and full scale testing and measurements. I participated in many projects and programs either as partner or project leader, numerous examples include *Project of exhaust gases cooling of marine diesel engines*, *Project of cooling the anti-ship missiles system RBS 15 B*, *Projects of ventilation system of Mala Kapela, Sveti Rok, Grič and Brinje tunnels* and many other tunnels in Croatia, Bosnia and Herzegovina and Montenegro which are currently under construction or in the preparation phase. During the period of 2002 - 2004 I participated in EUREKA project "Fire Factory Tunnel" (E! 2823) which is headed by Civil Engineering Faculty from Zagreb. Furthermore, I currently take a part in comprehensive research of *Wind barriers protection on highway Sveti Rok – Posedarje*, *Feasibility Study of Tunnel Medvednica* and countless other projects from tunnel engineering field and road infrastructure.

Parallel with my professional career I have become an expert witness at the *County Court of Zagreb* in the field of mechanical engineering and a member of the *Expert Witnesses Association of Croatia*. I am also a representative of Croatia in the World Road Organization (PIARC), focusing in the area of "*Fire and Smoke Control*" in road tunnels.