

# PRIKAZ METODOLOGIJE DIMENZIONIRANJA UZDUŽNE VENTILACIJE CESTOVNIH TUNELA S PRIMJENOM NUMERIČKOG MODELIRANJA

## A METHODOLOGY OF ROAD TUNNELS LONGITUDINAL VENTILATION SYSTEM DESIGN WITH APPLICATION OF NUMERICAL MODELLING

Arben Abrashi, dipl.ing.  
Brodarski institut d.o.o.,  
Av. V. Holjevca 20,  
10 020 Zagreb, Hrvatska  
e-mail: arben.abrashi@hrbi.hr

Dr. Zlatko Jankoski, dipl.ing.  
Brodarski institut d.o.o.,  
Av. V. Holjevca 20,  
10 020 Zagreb, Hrvatska  
e-mail: zlatko.jankoski@hrbi.hr

### **Sažetak**

*U radu su prikazani različiti kriteriji dimenzioniranja sustava ventilacije s obzirom na geometriju tunela i različite funkcionalne zahtjeve na ventilacijski sustav. Nadalje, prikazan je generički postupak dimenzioniranja ventilacijskog sustava uzimajući u obzir sve relevantne utjecajne faktore (temperatura zraka, brzine, tlakovi, meteorološki utjecaji, intenzitet prometa, geometrija tunela itd.). Poseban naglasak je stavljen na prikaz problematike dimenzioniranja ventilacijskog sustava namijenjenog za djelovanje u slučaju nastanka požara u tunelskoj cijevi.*

*Kao nadopuna konvencionalnim metodama projektiranja, prikazana je primjena numeričkog modeliranja fizikalnih polja cestovnih tunela pod utjecajem prisilne ventilacije, s ciljem definiranja ulaznih projektnih parametara.*

**Ključne riječi:** cestovni tunel, sustav ventilacije, projektiranje, numeričko modeliranje

### **Abstract**

*This work presents the application of different criteria necessary for designing of the ventilation system of road tunnels, while taking into account the geometry of the tunnel and the variety of functional demands on the ventilation system. The procedure of specification of ventilation system operational characteristics takes into account all relevant factors such as temperature, velocity, pressure, climate parameters, intensity of traffic, geometry of tunnel, etc. Special treatment is given to the ventilation system performance in case of fire incident within the tunnel volume.*

*In addition to conventional methods of designing, the utilisation of numerical modelling tools is presented. This includes the simulation of road tunnel operation under the influence of forced ventilation, with special emphasis on the generation of project input data.*

**Key words:** road tunnel, ventilation system, design, numerical modelling

### **1. UVOD**

Gradnja modernih prometnica, pogotovo autoputova, ima za cilj sigurno kretanje ljudi i transport robe u što kraćem vremenskom periodu. Kako bi ovi suprostavljeni zahtjevi bili zadovoljeni,

moderne prometnice se velikim svojim djelom sastoje od tzv. objekata (mostovi, vijadukati, usjeci, tuneli itd). Među tim objektima svojom složenošću posebno se izdvajaju tuneli, čiji su sastavni dio mnogobrojni tehnički sustavi a sve u cilju ispunjavanja sigurnosnih propisa i standarda.

Jedan od takvih značajnih tunelskih sustava je i sustav ventilacije. Uloga sustava ventilacije je dvojaka. Klasična uloga ventilacije podrazumjeva ventiliranje tunelske cijevi i osiguravanje propisane kvalitete zraka u tunelu. Druga uloga, koja je u novije vrijeme postala značajnija, podrazumjeva kontrolirano upravljanje dimom u svim fazama požarnog incidenta, s posebnim ciljem postizanja i održavanja tzv. stratifikacije dima u inicijalnoj fazi požara, odnosno omogućavanje kontroliranog odimljavanja bez tzv. povratnog strujanja (*engl. backlayering*) u fazi samog gašenja požara.

Sukladno ovoj dvojakoj ulozi ventilacije postoje i dva projektantska pristupa dimenzioniranju ventilacijskog sustava. U ovom referetu veći naglasak je stavljen na dimenzioniranje sustava ventilacije za požarni režim rada. Tako je u prvom dijelu referata prikazan klasičan projektantski pristup problematici dimenzioniranja ventilacijskog sustava, pri čemu su posebno istaknuti i svi nedostaci istoga.

U drugom dijelu ovog referata prikazan je pristup i metodologija numeričke simulacije požara (30 MW) u cestovnom tunelu i to u uvjetima prisilne uzdužne ventilacije, dok je kao objekt numeričke simulacije odabran dvocijevni jednosmjerni dvotračni cestovni tunel Brinje, dužine 1561 m, koji se nalazi na oko 120-om kilometru auto ceste (A1) Zagreb – Split, Hrvatska.

Tradicionalni način projektiranja sustava ventilacije cestovnih tunela, o kojemu će biti govora u prvom dijelu ovog referata, podrazumjeva razne metode proračuna i procjene određenih radnih parametara, baziranim na bezdimenzionalnim ili jednodimenzionalnim analizama te stacionarnim rješenjima [1]. Uzevši u obzir sve zahtjeve koje ventilacijski sustav jednog cestovnog tunela danas mora zadovoljiti, sa sigurnosnog i tehničkog aspekta, danas ovakav pristup više nije prihvatljiv i adekvatan za postizanje optimalnih radnih karakteristika ventilacijskog sustava. Neka od pitanja na koje tradicionalni pristup projektiranja ne može dati odgovor uključuju na primjer uvjete koje je potrebno postići za efikasnu stratifikaciju dima u slučaju požara, parametre koji osiguravaju dovoljnu vidljivost u tunelu ili čak raspored temperaturnih nivoa u tunelu u slučaju požara.

Dakle, s obzirom da je požarne eksperimente velikih i realnih razmjera prerizično i neekonomično izvesti u stvarnim tunelima, danas se kao pomoćni alat sve više koristi numeričko modeliranje. Glavni cilj ovakvog pristupa je što vjerodostojnije opisati procese od interesa ali u virtualnom vremenu i prostoru koristeći realne zakone fizike i kemije.

## 2. ZAKONSKA REGULATIVA

Što se tiče projektiranja ventilacijskih sustava cestovnih tunela, zakonska regulativa u Republici

Hrvatskoj je nepotpuna te sa projektantskog aspekta nedovoljna. Od izvorno hrvatskih zakona, o sustavima ventilacije tunela, može se navesti samo *Pravilnik o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama – SL 59/73* [2] iz 1973. god, dok sam pravilnik sadrži oko 11 članaka koji se odnose na ventilaciju tunela (od 42. do 52. članka – *Poglavlje IX Provjetravanje*).

Na temelju toga, u Hrvatskoj su kao zakonsko uporište, kako bi se omogućio normalan rad i usklađena međusobna suradnja projekatanta i inspektora, odabrane austrijske RVS smjernice [3]. Radi se o riješenju koje je zadovoljavajuće za sve uključene u izradi i ovjeri projekata te i za operatere ventilacijskog sustava. S obzirom da se ipak radi o smjernicama a ne o zakonu, važno je napomenuti da je potreban legitimitet spomenutih smjernicama, dat na način da je prilikom izdavanja lokacijske dozvole u tzv. *Posebnim uvjetima građenja iz područja zaštite od požara* definirano da tuneli moraju biti projektirani sukladno austrijskim smjernicama RVS (9.261, 9.262, 9.27, 9.280, 9.281 i 9.282).

Pored RVS smjernica, od 2004. godine u upotrebi je i Europska direktiva 2004/54/EC [4] (*Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network*) koja je također obvezujuća za sve autoceste na Trans-Europskim koridorima, u koje hrvatske autoceste te bosansko-hercegovački koridor Vc pripadaju.

## 3. VENTILACIJSKI SUSTAVI U CESTOVNIM TUNELIMA REPUBLIKE HRVATSKE

Ventilacijske sustave cestovnih tunela općenito su podijeljeni u tri skupine:

- Uzdužna ventilacija,
- Poprečna ventilacija i
- Polupoprečna ventilacija

Sva tri navedena tipa ventilacijskih sustava zastupljena su u svijetu u većoj ili manjoj mjeri, pri čemu je uočeno da pojedine zemlje preferiraju manje-više uvijek isti tip ventilacijskih sustava. U tom pogledu ni Hrvatska nije iznimka. U Hrvatskoj se u pravilu ugrađuju sustavi uzdužne ventilacije i to još od 1981. godine, kada je sagrađen prvi veliki hrvatski cestovni tunel, Učka.

Razlozi za odabir isključivo sustava uzdužne ventilacije su doista raznoliki, od ekonomskih do funkcionalnih, ali bez obzira na to, i dalje se vode diskusije o tome da li je primjena uzdužne ventilacije optimalno rješenje ili ne. Neki od argumenata odnose se na kvalitetu zraka u tunelu, koja opada u smjeru kretanja zračne mase kroz tunel, što nije slučaj sa poprečnom ili polupoprečnom ventilacijom. U tom slučaju kvaliteta zraka je gotovo ista po cijeloj dužini tunela jer se svjež zrak dovodi kroz spuštene

strop uz ravnomjerno upuhivanje u sve dijelove tunela.

Nadalje, kao dodatni nedostatak uzdužne ventilacije istaknuta je maksimalna dozvoljena brzina strujanja zraka u tunelu, koja je ograničena na 8 m/s [2] (*Pravilnik o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama – SL 59/73, članak 48.*). S obzirom da sav svjež zrak za potrebe provjetravanja mora proći kroz portal tunela ograničenog presjeka (*u Hrvatskoj većina tunela ima poprečni presjek od oko 56 m<sup>2</sup>*), povećanjem dužine tunela povećava se i zahtjev za potrebnom količinom svježeg zraka, a time dolazi i do porasta njegove uzdužna brzine strujanja. Kao posljedica toga definirana je maksimalna dužina tunela s uzdužnom ventilacijom od nekih 7 km.

S druge strane, uzdužna ventilacija ima određenih ekonomsko tehničkih prednosti u odnosu na preostale tipove ventilacije. Tako je na primjer sustav uzdužne ventilacije značajno jeftiniji od bilo kojeg drugog sustava ventilacije jer ne zahtjeva izgradnju portalnih strojarnica, nema velikih građevinskih zahvata ugradnje spušenog stropa od visoko vatrootpornih materijala, te što je najbitnije, poprečni presjek tunelske cijevi s uzdužnom ventilacijom značajno je manji u donosu na minimalno potreban poprečni presjek tunela kod poprečne ventilacije. Nadalje, sustav uzdužne ventilacije pruža veću mogućnost kontroliranja dima u slučaju požarnog incidenta, što je u novije vrijeme gotovo dominantan kriterij za dimenzioniranje sustava ventilacije.

Zbog činjenice da je s funkcionalnog stanovišta sustav ventilacije jedini sustav u tunelu koji svojim aktivnim djelovanjem može pridonijeti spašavanju ljudi u slučaju požarnog incidenta, njegova uloga u normalnom režimu rada s projektnog stanovišta postaje sekundarna. Ovdje valja naglasiti da je upravljane dimom moguće do neke mjere sa sva tri tipa ventilacijskih sustava, no prema mišljenju autora i prihvaćenoj inženjerskoj praksi u Hrvatskoj, najpouzdanije upravljanje se postiže primjenom uzdužne ventilacije, pogotovo kod velikih požara. Nažalost, u Europi je zadnjih godina bilo nekoliko katastrofalnih požara s mnogobrojnim ljudskim žrtvama i to upravo u tunelima s poprečnom ili polupoprečnom ventilacijom kod kojih kontrola dima nije bila zadovoljavajuća [5].

#### **4. KRITERIJI ZA PROJEKTIRANJE SUSTAVA UZDUŽNE VENTILACIJA U OVISNOSTI O DUŽINI TUNELA**

U prethodnom poglavlju navedeno je da postoji nekoliko kriterija za dimenzioniranje ventilacijskih sustava. Prvi kriterij je propisana kvaliteta zraka u tunelu, dok je drugi kriterij sposobnost ventilacijskog sustava da postigne odgovarajuću uzdužnu brzinu

strujanja kojom se može uspješno provesti odimljavanje tunelske cijevi u slučaju požarnog incidenta. Koji od navedenih kriterija će se primijeniti pri projektiranju, ovisi najviše o duljini tunela.

##### **4.1. Tuneli dužine iznad 4 km**

Ventilacijski sustavi tunela dužine iznad 4 km gotovo se u pravilu projektiraju prema kriteriju kvalitete zraka u tunelu pri normalnom režimu rada. Ventilacija takvih tunela dimenzionira se na način da se definira maksimalna količina zraka koju je potrebno dovesti u tunelsku cijev kako bi se osigurala zakonom propisana maksimalna dozvoljena koncentracija ugljičnog monoksida (CO), dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>) te krutih čestica u najnepovoljnijim uvjetima eksploatacije. Na temelju te količine zraka, definira se potrebna potisna sila, odnosno broj ventilatora, kako bi se svladali svi prisutni otpori u tunelu.

Kod ovako dugačkih tunela, potrebna potisna sila ventilatora za provjetravanje tunela u normalnom režimu rada najčešće je veća je od potisne sile potrebne za svladavanje otpora u tunelu u požarnom režimu.

Ovdje je potrebno naglasiti da uvijet o graničnoj dužina tunela (iznad 4 km) nije egzaktno definiran, te da se pri određenim uvjetima može dogoditi i obrnuta situacija kada je potrebna potisna sila za postizanje kritične brzina u požarnom režimu veća od potrebne potisne sile u normalnom režimu, iako je brzina zraka u tunelu kod normalnog režima značajno veća od kritične brzine. Iz tog razloga preporuka je autora da se za te granične slučajeve (dužine tunela oko 4 km) ventilacijski sustav projektira prema oba kriterija, te da se kao konačno riješenje uzima nepovoljniji slučaj.

##### **4.2. Tuneli dužine od 900 m do 4 km**

Ventilacijski sustavi tunela dužine od 900 m do 4 km projektiraju se prema kriteriju potisne sile koja je potrebna kako bi se tijekom požarnog incidenta postigla tzv. kritična brzina.

Dosadašnje iskustvo pokazuje da je, za navedeni raspon dužine tunela, potrebna potisna sila za svladavanje otpora u slučaju požara uvijek veća od potrebne potisne sile za svladavanje otpora u normalnom režimu rada. Postavljena donja granice dužine tunela od 900 m posljedica je činjenice da u tunelu kraćem od 900 m nije moguće fizički smjestiti dovoljan broj ventilatora kako bi se postigla potrebna kritična brzina za odimljavanje.

##### **4.3. Tuneli dužine od 500 do 900 m**

Ventilacijski sustavi tunela dužine od 500 do 900 m projektiraju se prema kriteriju potrebne potisne sile kako bi se u normalnom režimu rada, odnosno u inicijalnoj fazi požara, postigla brzina od 1,5 m/s. Na taj način se definira zadovoljavajuće funkcionalan sustav ventilacije koji u požarnom režimu omogućuje dovoljan dotok svježeg zraka kako bi se spriječilo stvaranje eksplozivnih smjesa.

Ovako projektiran sustav principijelno nema kapaciteta da izvrši pouzdano odimljavanje kritičnom brzinom, ali uz povoljne meteorološke uvijete može pridonijeti sigurnosti vatrogasaca i spasilačkih službi. Što se tiče tunela kraćih od 500 m prihvaćena je praksa da se u takve tunele ne ugrađuje ventilacija, odnosno da je predviđena tzv. prirodna ventilacija. Tako na primjer članak 3 europske direktive 2004/54/EC [4] (*Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network*) ne prepoznaje tunele kraće od 500 m kao značajne građevine.

## 5. DIMENZIONIRANJE SUSTAVA VENTILACIJA

### 5.1. Normalni režim rada

Dimenzioniranje ventilacijskog sustava tunela s obzirom na normalni režim rada provodi se u tri koraka:

- proračun minimalno potrebne količine zraka koju treba dovesti u tunel kako bi se osiguralo da koncentracija CO, NO<sub>x</sub> i krutih čestica ne prelazi zakonom propisane vrijednosti,
- na osnovu definirane potrebne količine zraka definira se brzina strujanja zraka u tunelskoj cijevi,
- na osnovi brzine strujanja definiraju se svi otpori u tunelu, te se prema njima dimenzionira ventilacijski sustav.

Definiranje minimalno potrebne količine zraka [m<sup>3</sup>/s] koju je potrebno dovesti u tunelsku cijev izvodi se prema austrijskim RVS smjernicama (9.262). U navedenim smjernicama definiran je kompletan postupak proračuna potrebne količine zraka za sve brzine kretanja vozila u tunelu (0 – 110 km/h) pri čemu se kao ulazni parametri uzimaju:

- struktura prometa (broj vozila, udio teretnih vozila itd.),
- geometrija tunela (duljina, nagib segmenata, nadmorska visina itd.),
- te proračunska godina.

Ostatak proračuna, koji podrazumijeva definiranje svih otpora koje ventilacijski sustav mora savladati u navedenom režimu rada, detaljno je prikazan u austrijskim i norveškim smjernicama [6].

### 5.2. Požarni režim rada

Dimenzioniranje ventilacijskog sustava s obzirom na požarni režim nešto je složenije zbog činjenice da se u proračunu pojavljuju radni nestacionarni parametri požara koji još nisu u potpunosti definirani u literaturi. I u ovom slučaju je, kao i kod normalnog režima rada ventilacijskog sustava, potrebno definirati sve otpore u tunelu, s tom razlikom da se zbog varijabilnosti radnih parametara pojavljuje dodatni problem određivanja projektnog kritičnog slučaja.

Za projektno kritičan slučaj prema kojem se projektira sustav ventilacije najčešće se uzima stanje fizikalnih veličina u tunelu (temperaturna polja, raspored statičkih tlakova, propagacija dima, broj zaostalih vozila u tunelu, itd.) u vremenskom intervalu između 8 i 10 minute od izbijanja požara. Navedeni vremenski interval odabran je pod pretpostavkom da je do tog trenutka evakuacija putnika iz tunela završena, da je proces stratifikacije dima zaustavljen, te da se može krenuti s odimljavanjem tunela uspostavljanjem kritične brzine kroz tunel.

Kako se kod odimljavanja ventilacijski sustav ne prilagođava već uspostavljenom smjeru strujanja zraka, već se smjer odimljavanja određuje prema zahtjevu zapovjednika vatrogasne postrojbe na terenu, prilikom dimenzioniranja ventilacijskog sustava pretpostavlja se da sve sile koje utječu na strujanje zraka u tunelu djeluju u smjeru suprotnom od smjera odimljavanja (najnepovoljniji slučaj). U tom smisli kao relevantni za dimenzioniranje sustava ventilacije pojavljuju se slijedeći otpori:

- otpor trenja i ostali lokalni otpori,
- otpori uzrokovani razlikom barometarskih tlakova na portalima svedeni na istu nadmorsku visinu,
- otpor vozila,
- otpor vjetra na portalima,
- tzv. efekt dimnjaka,
- te otpor samog požara

Otpori koji se mogu definirati kao stacionarne pojave (otpor trenja, razlika barometarskih tlakova i otpor vjetra) relativno su dobro definirani i dokumentirani u literaturi i smjernicama za projektiranje, te kao takvi ne predstavljaju problem prilikom proračuna. Stvaran problem su otpori vezani za sam požar, za koje u literaturi nema dovoljno podataka, odnosno vrijednosti raspoloživih podataka su navedene u širokom rasponu te su kao takvi teško primjenjivi tokom projektiranja.

#### Efekt dimnjaka

Efekt dimnjaka je pojava uzdužnog strujanja zraka u tunelu koja nastaje uslijed različitih temperaturnih nivoa unutar i izvan tunelske cijevi, te pri geodetskoj razlici u visini portala tunela uslijed nagiba tunela. Efekt dimnjaka u slučaju požara definira se nešto drugačije u odnosu na normalni režim rada. U slučaju požara, na efekta dimnjaka uslijed

normalnog režima rada pridodaje se i efekt dimnjaka uslijed pojave vrućih dimnih plinova u zadimljenom djelu tunela. Prema RVS smjernicama (9.261 - dodatak iz 2001. godine), odnosno prema revidiranim RVS smjernica, efekt dimnjaka uslijed požara definiran je sljedećom formulom:

$$F_{D,požar} = \Delta p_{D,požar} \cdot A = \rho \cdot g \cdot \frac{\Delta T}{T_t} \cdot \alpha \cdot L_x \cdot A \quad (1)$$

Ovisno o snazi požara, prema istim smjernicama definirano je povećanje temperature u dijelu tunela zahvaćenog požarom, odnosno definirana je za proračun relevantna duljina požara ( $L_x$ ) (Tablica I).

Tablica I: Povećanje temperature u segmentu tunela zahvaćenom požara

	Toplinsko opterećenje [MW]		
	5	30	50
Povećanje temperature	25 K	65 K	90 K
Relevantna duljina požara	400 m	800 m	800 m

Iz gore prikazane tablice evidentan je nedostatak postojećih podataka u RVS smjernicama, gdje na primjer i onako već načelni podaci ne omogućavaju proračun efekta dimnjaka u slučaju kada je toplinsko opterećenje požara veće od 50 MW.

Također, s obzirom na relativno mali broj parametara koji u ovom slučaju opisuju efekt dimnjaka, cjelokupni proračun bi se trebao uzeti sa određenom rezervom.

Iz tog razloga mišljenje je autora da bi se upotrebom numeričkog modeliranja ovaj problem mogao detaljnije analizirati, uz upotrebu raspoloživih eksperimentalnih podataka.

### Otpor samog požara

Otpor samog požara, zbog karaktera samog procesa izgaranja i lokalnih uvjeta, također predstavlja kompleksnu varijablu pri projektiranju sustava ventilacije.

S obzirom da ne postoje pouzdani izmjereni podaci, u ovom slučaju interesantna je i preporuka PIARC-ove radne grupe broj 6 [7] (Tehničkog odbora C-5), gdje u radnom dokumentu iz 2003. godine navode da se definiranje otpora samog požara izvrši numeričkim modeliranjem.

Ipak, za potrebe klasičnog projektiranja u gore spomenutom PIARC-ovom dokumentu navedeni su približni iznosi pada tlaka uslijed požara (Tablica II). Kao što se iz tablice može vidjeti padovi tlakova su definirani u vrlo širokom rasponu i to samo za dvije snage požara, 30 i 200 MW.

Evidentno je da podaci ovakvog karaktera nisu lako primjenjivi za projektantske potrebe.

Tablica II: Pad tlaka uslijed požara

Snaga požara	Pad tlaka [Pa]
30 MW	10 -20
200 MW	40 -100

Iz tog razloga, na Brodarskom institutu pokrenuta je nova aktivnost numeričkog modeliranja fizikalnih polja unutar tunela pri normalnim te požarnim uvjetima ventilacije. Cilj nove djelatnosti je analiza i definiranje pojedinih projektnih parametara, kako bi se moglo pristupiti optimalnom dimenzioniranju ventilacijskih sustava u cestovnim tunelima.

## 6. ULOGA NUMERIČKOG MODELIRANJA TOKOM PROJEKTIRANJA TUNELA

Primjenom numeričkog modeliranja moguće je proširiti sveopće znanje o fizičkim procesima koji se dešavaju unutar tunela pri raznim radnim okolnostima, a pogotovo u slučaju požara kao najkritičnijim scenarijem za sigurnu funkcionalnost tunela.

U tu svrhu numeričko modeliranje postaje sve češći pomoćni alat tokom projektiranja i optimiziranja kako ventilacijskih sustava tunela tako i samog algoritma upravljanja inteligentnim ventilacijskim sustavom pri raznim režimima rada. Neke od primjena uključuju:

- numeričke simulacije upravljanja dimom u slučaju požara unutar glavne cijevi tunela te poprečnih evakuacijskih prolaza [1],
- analiza koncentracije ispušnih/dimnih plinova i stupnja vidljivosti tokom normalnog odnosno incidentnog režima u tunelu [8],
- procjene raspoloživog vremena za evakuaciju iz tunela,
- analizu mogućih incidentnih scenarija unutar tunela [9], [10],
- analizu utjecaja raznih parametara, kao što su meteorološki uvjeti, geometrija tunela, intenzitet prometa, itd, na funkcionalnost ventilacijskog sustava [11], [12],
- te na primjer detaljnu aerodinamičku i termodinamičku analizu fizikalnih procesa u dijelu tunela zahvaćenim požarom [13].

Ipak, detaljne i sveobuhvatne analize, koje uključuju trodimenzionalnu i nestacionarnu problematiku, odnosno složenu interakciju kemijskih reakcija i turbulentnog ponašanja fluida, te mnoštvo ostalih parametara koji utječu na rad ventilacijskog sustava,

još su vremenski neisplative zbog limitiranih kapaciteta današnjih računala. Tome se djelomično doskočilo raznim pojednostavljenjima cjelokupnog problema, o kojima će biti nešto više govora u sljedećem poglavlju.

Uzevši u obzir prirodu numeričkih simulacija, klasični način projektiranja i dalje će imati vodeću ulogu u određivanju glavnih parametara sustava ventilacije, dok numeričke analize mogu dati odgovor pri razvoju osnovnog koncepta funkcionalnosti sustava ventilacije te daljnjeg optimiziranja njegovog rada.

## 7. NUMERIČKI PRISTUP

### 7.1. Uvod

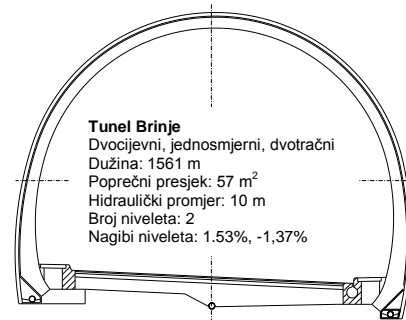
Za potrebe numeričkog modeliranja požara u tunelu Brinje korišten je komercijalni programski paket Fluent. Programski paket Fluent je "CFD" (eng. computational fluid dynamics) program opće namjene koji opisuje tok fluida, prijenos topline i transport materije u kompleksnim geometrijama. Program rješava jednadžbe očuvanja mase, momenta, energije, koncentracije fluida, intenzitet termalne radijacije, i ostalih fizikalnih veličina, dok neki od fizikalnih modela uključuju široki spektar modela turbulencije, modela izgaranja (homogeno, heterogeno, površinske reakcije), itd. Nadalje, program omogućuje generiranje nestruktuiranih i dinamičkih mreža modela, stacionarnu i nestacionarnu analizu problema. Detaljnije informacije o karakteristikama programskog paketa Fluent mogu se pronaći na ANSYS-ovoj internet stranici [14].

U odnosu na druga područja primjene numeričkog modeliranja, odnosno Fluentu, ovdje je važno uzeti u obzir činjenicu da je za očekivati nešto niži nivo točnosti numeričkih rezultata [1]. Razlog tomu su mnogobrojna pojednostavljenja i pretpostavke koja su uzeta u obzir tokom numeričkog modeliranja, uz zanemarivanje pojedinih ulaznih parametara, kao što je na primjer kretanje vozila unutar tunela. Uzimanje u obzir svih radnih parametara i njihovih varijabli, te mogućih scenarija, dodatno bi opteretilo numeričku analizu, rezultirajući u nerealnom vremenu potrebnim za simulaciju jednog scenarija, te nerealnom broju potrebnih simulacija. Detaljniji prikaz numeričkog pristupa prikazan je u nastavku.

### 7.2. Numerička geometrija tunela

Numeričko modeliranje požara u tunelu izvršeno je za postojeći dvocijevni tunel Brinje (auto cesta A1, Zagreb – Split), dužine 1561 m, i to samo za jednu cijev tunela. Nadalje, kako bi se reduciralo vrijeme potrebno za numeričku simulaciju, za detaljniju

analizu požarnog scenarija odabran je samo manji segment tunela, dužine 300 m. Inače, za tunele je karakteristična neproporcionalnost dimenzija gdje je hidraulički promjer tunela u pravilu značajno manji u odnosu na dužinu tunela. Najčešći rezultat toga su generirane numeričke mreže tunela sa velikim brojem kontrolnih volumena, što direktno utječe na vrijeme potrebno za simulaciju.

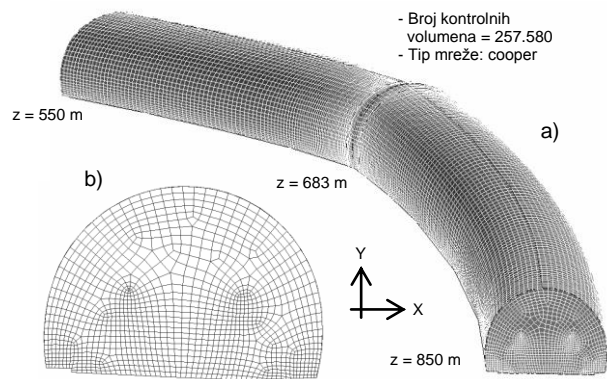


Slika 1: Poprečni presjek lijeve cijevi tunela Brinje

Sam tunel Brinje ima dva blaga zavoja te dva nagiba u uzdužnom smjeru:

- pozitivni nagib od 1,53% (od 0 do 683 m)
- negativni nagib od 1,37% (od 683 do 1561 m)

Gore spomenuti segment tunela ( $L = 300$  m) odabran je tako da uključuje oba nagiba, te predstavlja dio tunela od 550-tog do 850-tog dužnog metra. Neke od geometrijskih karakteristika tunela, te njegov karakteristični poprečni presjek prikazani su na Slici 1.



Slika 2: Numerički generirana geometrija i mreža tunela (a-segment tunela, b-poprečni presjek)

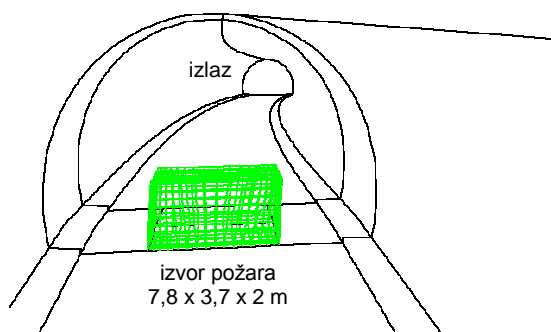
Generirana geometrija i numerička mreža prikazani su na Slici 2. Za odabrani segment tunela generirana je nestrukturirana numerička mreža od nekih 257 580 kontrolnih volumena (Slika 2-a), dok je za vrstu numeričke mreže odabran najvećim djelom tip "cooper" (Slika 2-b).

### 7.3. Fizikalni modeli

#### 7.3.1. Model požara

Proces izgaranja unutar tunela ovisi o vrsti materije koja je zahvaćena požarom te lokalnim uvjetima pri kojima se izgaranje odvija. Izgaranje samo po sebi je kompleksan proces koji je predmetom mnogobrojnih istraživačkih studija, te kao takvo nije primjenjivo za ovaj nivo inženjerske i praktične primjene numeričkog modeliranja. Sukladno tome, u ovom slučaju požar je tretiran kao izvor mase produkata izgaranja te topline, te je opisan predefiniranim funkcijama promjene spomenutih varijabli u vremenu.

U predviđenom scenariju kao izvor požara zamišljeno je prevrnuo teretno vozilo, dimenzija 7,8 x 3,7 x 2 m, dok je njegova lokacija postavljena na najvišoj točki tunela, odnosno na mjestu prijelaza sa pozitivnog na negativni nagib kolnika tunela (L = 683 m), te po sredini poprečnog presjeka tunela. Lokacija izvora požara prikazan je na Slici 3. Sam požar uzrokovan je zapaljenjem teretnog vozila sa gorućim teretom, koje je u ovom slučaju celuloza  $C_6H_{10}O_5$ , dok je predviđena snaga požara 30 MW.



Slika 3: Lokacija izvora požara ( $V=25,91 \text{ m}^3$ )

Količina oslobođene topline u vremenu  $Q(t)$ , definirana je sljedećim algebarskim izrazima:

- rast intenziteta požara (od  $t=0$  do  $t=t_g$ )

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

- maksimalni intenzitet požara (od  $t=t_g$  do  $t=t_d$ )

$$Q(t) = Q_{\max}$$

gdje je  $Q$  (W) količina oslobođene topline,  $t$  (s) vrijeme,  $t_g$  (s) vrijeme potrebno za razvoj požara do maksimalnog intenziteta,  $t_d$  (s) vrijeme maksimalnog intenziteta požara, te  $\alpha$  ( $\text{W/s}^2$ ) koeficijent rasta.

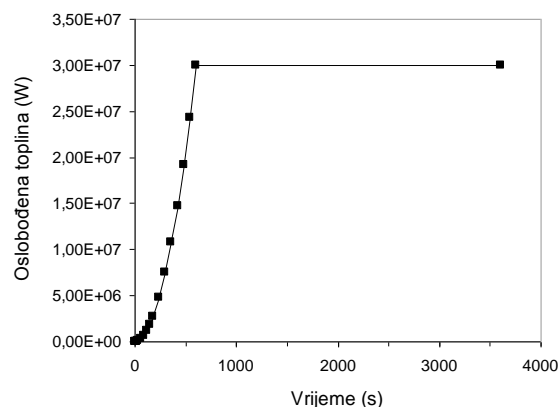
Za potrebe ovog rada vrijednosti gore navedenih veličina preuzete su iz [15], te iznose:

- $Q_{\max} = 30 \text{ MW}$ ,
- $t_g = 10 \text{ minuta}$ ,
- $t_d = 60 \text{ minuta}$ ,
- $\alpha = 83,333 \text{ W/s}^2$ ,

dok je grafički prikaz navedenih podataka prikazan Slikom 4.

S obzirom da je vrijeme trajanja maksimalnog intenziteta požara 60 minuta, što uvelike prelazi vrijeme numeričke simulacije, period smanjenja oslobođene topline tokom nestajanja požara ovdje nije prikazan.

Na sličan način, korištenjem vrijednosti za stohiometrijsko izgaranje odabranog goriva, definirane su i vrijednosti količine dimnih plinova u funkciji vremena.



Slika 4: Oslobođena toplina požara u vremenu (30 MW)

#### 7.3.2. Model turbulencije

Numeričkim modeliranjem predviđen je turbulentni tok fluida kroz tunel, te je u tu svrhu primijenjen RNG modificirani  $k-\epsilon$  model turbulencije [16], uključujući utjecaj uzgonskih i gravitacijskih sila kako na isti, tako i na cjelokupni tok fluida. Prema preporukama iz literature [1], navedeni tip turbulentnog modela najkvalitetnije opisuje ponašanje fluida i njegovo miješanje sa okolinom u slučajevima kada uzgonske sile imaju značajan utjecaj (topla struja okružena hladnijom okolinom).

#### 7.3.3. Model radijacije

Prijenos topline putem radijacije nije uključen u postojeći model. Ipak, utjecaj radijacije uzet je u obzir na način da je, na temelju iskustvenih podataka [1], procijenjeno da oko 30% požarom oslobođene topline biva predana okolnim zidovima. Na temelju toga izvršena je korekcija požarnog modela (paragraf 3.3.1) gdje je sveukupna količina oslobođene topline umanjena za iznos radijacijom predane okolnim zidovima (30%).

### 7.4. Radni i rubni uvjeti

Pod radnim i rubnim uvjetima podrazumijevaju se ulazni parametri potrebni za pokretanje numeričke

simulacije. Neki od njih su ukratko sumirani kako slijedi.

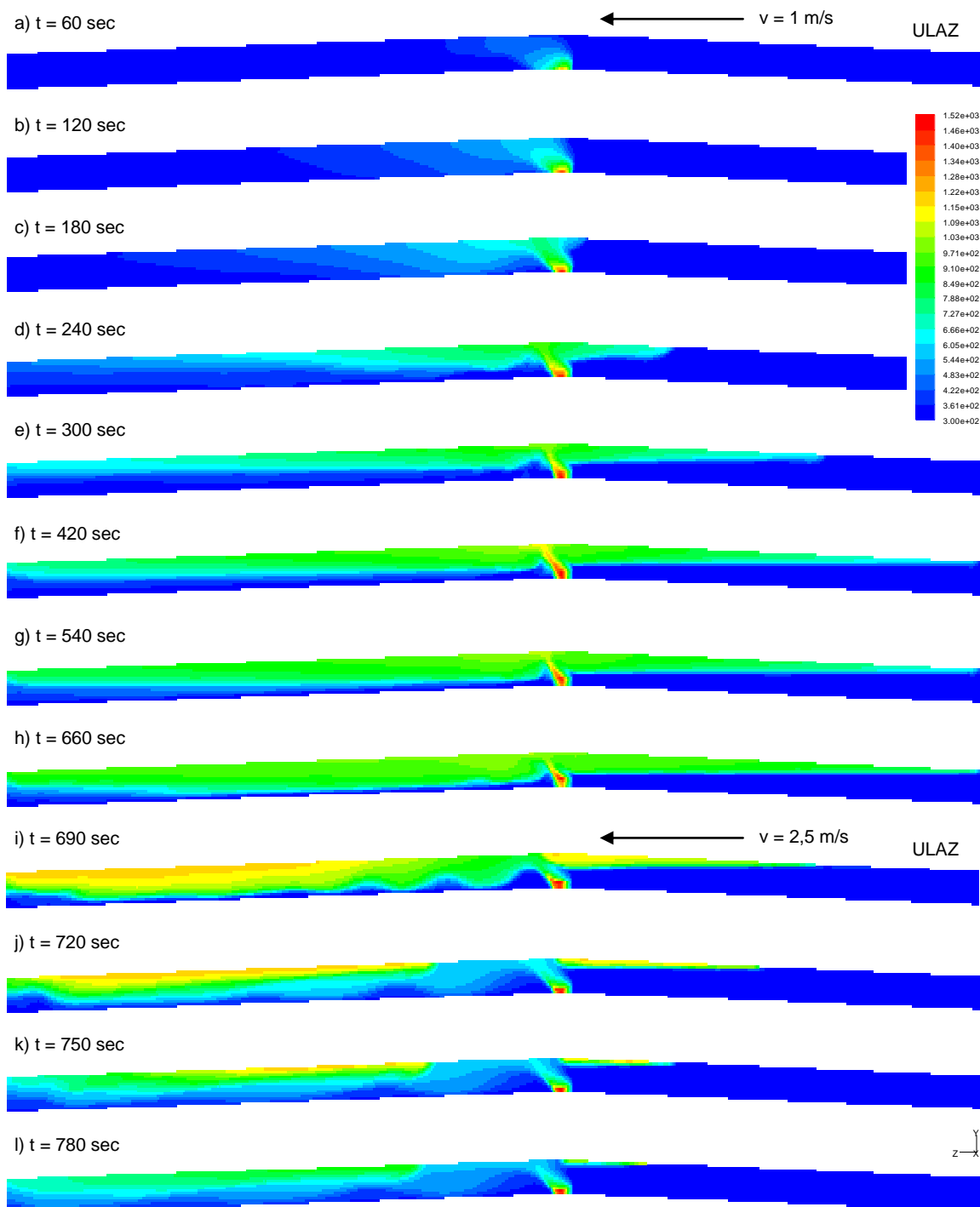
Ulazni portal (eng. velocity inlet) odabranog segmenta tunela definiran je ulaznom brzinom (1 m/s), turbulentnim uvjetima (5%, 0,7 m), te temperaturom (293,15 K).

Izlazni portal (eng. pressure outlet) odabranog segmenta tunela definiran je statičkim tlakom (0 Pa), turbulentnim uvjetima (5%, 0,7 m), te temperaturom (293,15 K).

Svi zidovi koji definiraju geometriju tunela, uključujući i nogostup te kolnu površinu, definirani su kao adijabatske površine, odnosno sa nultom izmjenom topline sa okolinom.

## 8. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

Pretpostavljeni scenarij prema kojem je izvršena



Slika 5: Razvoj temperaturnih polja u ovisnosti o vremenu uslijed požara u tunelu (od a do h – prirodno strujanje kroz tunel ( $v = 1$  m/s); od h do l – uzdužna ventilacija ( $v = 2,5$  m/s))



numerička simulacija mogao bi se ukratko opisati kako slijedi.

U prvom koraku simulirano je strujanje zračne struje (uzdužne brzine 1 m/s) kroz tunel pri stacionarnim uvjetima, kako bi se dobilo u potpunosti razvijeno polje brzina kroz cijeli volumen segmenta tunela. Ovaj korak podrazumijeva idealizirano stanje normalnog rada sustava ventilacije, gdje je uslijed prisilne ventilacije kroz tunel uspostavljena konstantna brzina strujanja od 1 m/s.

U drugom koraku kao ulazni podaci upotrijebljeni su rezultati iz prijašnjeg koraka, odabrani su nestacionarni uvjeti, te je u trenutku  $t_1 = 0$  sekundi iniciran požar pri gore definiranim uvjetima. Uzevši u obzir da je potrebno nekih 10 minuta da bi se požar razvio do svog maksimalnog intenziteta (Slika 4), simulacija požara u tunelu prekinuta je nakon  $t_2 = 660$  sekundi. Ovaj korak podrazumijeva potpuno razvijeni požar u tunelu do trenutka kada započinje proces odimljavanja.

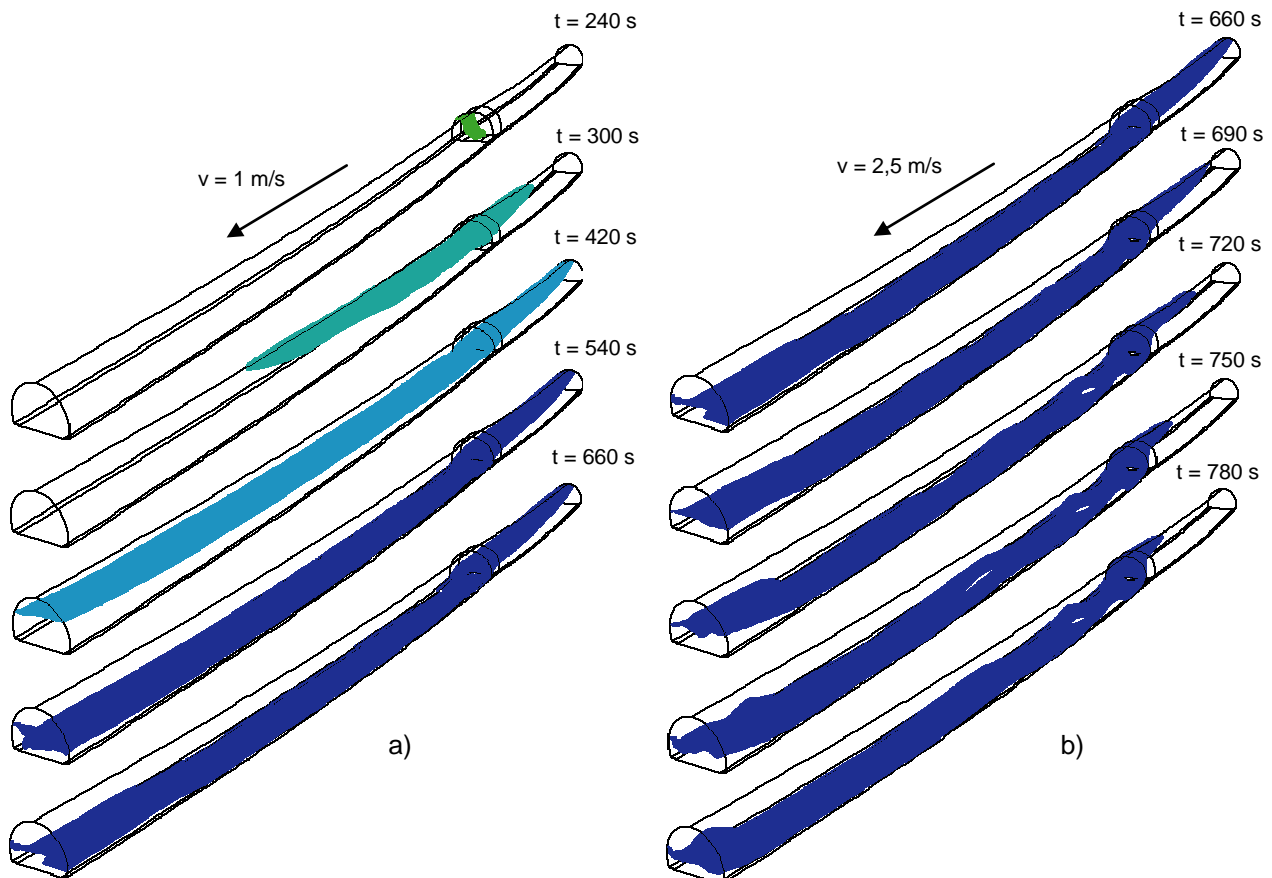
U trećem koraku povećana je pomoću sustava ventilacije uzdužna brzina strujanja sa 1 m/s na 2,5 m/s, te je simuliran proces odimljavanja tunela do trenutka  $t_3 = 780$  sekundi.

Uzevši u obzir prirodu cjelokupnog postupka, te činjenicu da su prikazani rezultati rezultat početnih

aktivnosti na području numeričkog modeliranja, mišljenje je autora ovog referata da je cjelokupni postupak prihvatljive naravi, dok bi se numerički rezultati trebali sagledati prvenstveno sa kvalitativnog aspekta. Predviđenim budućim aktivnostima (vidi Zaključak) postigla bi se njihova transparentna vjerodostojnost te kvantitativni karakter.

Razvoj temperaturnih polja uzduž segmenta tunela u ovisnosti o vremenu prikazan je na Slici 5, i to za prvi vremenski interval (od  $t_1 = 0$  s do  $t_2 = 660$  s) pri uzdužnoj brzini strujanja zračne struje od 1 m/s, te za drugi vremenski interval (od  $t_2 = 660$  s do  $t_3 = 780$  s) pri uzdužnoj brzini strujanja zračne struje od 2,5 m/s.

Iz prikazanih rezultata za prvi vremenski interval (od a do h), vidljivo je rasprostiranje toplih produkata izgaranja i u smjeru suprotnom od smjera uzdužnog strujanja (eng. backlayering). S obzirom da je uzdužna brzina strujanja u tunelu relativno mala (1 m/s), ovakvo "povratno" strujanje dimnih plinova bilo je za očekivati jer ista ne može potisnuti uzgonom i geometrijom tunela pogonjenu toplu struju nakupljenu pri stropu tunela. Sa sigurnosnog aspekta ovakva fizikalna pojava, stratifikacija (eng. stratification), je poželjna pri nastanku požara u



Slika 6: Razvoj dima u ovisnosti o vremenu uslijed požara u tunelu (a- uzdužno strujanje kroz tunel,  $v = 1$  m/s; b- uzdužno strujanje kroz tunel,  $v = 2,5$  m/s)

tunelu jer omogućuje stvaranje još uvijek sigurne zone za evakuaciju putnika. Suprotno tome, u smjeru uzdužnog strujanja vidljiva je, u ovisnosti o vremenu, sve veća popunjenost poprečnog presjeka tunela toplim produktima izgaranja.

Nakon povećanja uzdužne brzine strujanja u tunelu sa 1 m/s na 2,5 m/s, drugi vremenski interval (od  $t_2 = 660$  s do  $t_3 = 780$  s), započinje proces odimljavanja ulaznog segmenta tunelske cijevi, koji se u ovom slučaju može prikazati kao rad sustava uzdužne ventilacije u požarnom režimu. Na Slici 5 (od  $i$  do  $l$ ) vidljivo je potiskivanje toplih dimnih plinova u smjeru uzdužnog strujanja, gdje je u trenutku  $t_3 = 780$  s ulazni dio tunela skoro pa u potpunosti odimljen, dok se u izlaznom dijelu tunela može primijetiti značajno sniženje temperaturnog nivoa preostalih dimnih plinova.

Za predviđeni scenarij i prikazane rezultate može se zaključiti da brzina uzdužnog strujanja zraka u tunelu od 2,5 m/s omogućava u potpunosti kontrolu nad povratnim strujanjem toplih dimnih plinova.

Nadalje, u ulaznom dijelu tunela evidentan je utjecaj sile uzgona na dimne plinove gdje se zagrijani dimni plinovi zadržavaju pri stropu tunela, dok je sam efekt još dodatno izražen i uslijed nagiba ulaznog dijela tunela.

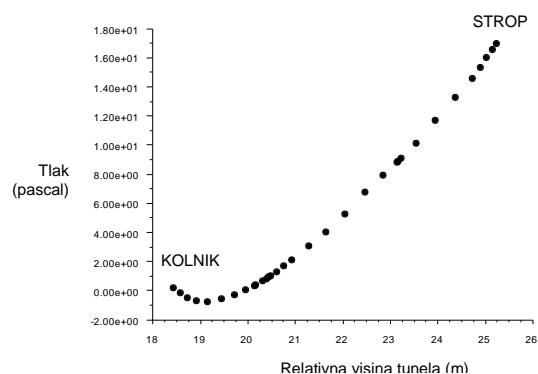
Slično gore navedenom može se kazati i za razvoj dima u tunelu za vrijeme prvog vremenskog intervala (od  $t_1 = 0$  s do  $t_2 = 660$  s) pri uzdužnoj brzini strujanja zračne struje od 1 m/s (Slika 6-a), te za vrijeme drugog vremenskog intervala (od  $t_2 = 660$  s do  $t_3 = 780$  s) pri uzdužnoj brzini strujanja zračne struje od 2,5 m/s (Slika 6-b).

Za vizualizaciju razvoja dima unutar tunela korištena je koncentracija dimnih plinova od 0.01 kg/kg, te je prikazana kao "iso" – površina koja obuhvaća sve koncentracije iznad 0.1 kg dimnih plinova po kg okolnog fluida.

Sa Slike 6-a vidljiva je u vremenu stratifikacija dimnih plinova u ulaznom dijelu tunela, te popunjavanje poprečnog presjeka tunela u izlaznom dijelu tunela iza požarne zone, dok povećanjem uzdužne brzine strujanja (Slika 6-b), započinje proces odimljavanja, odnosno potiskivanja dimnih plinova prema izlazu iz tunela.

Za potrebe klasičnog projektiranja sustava

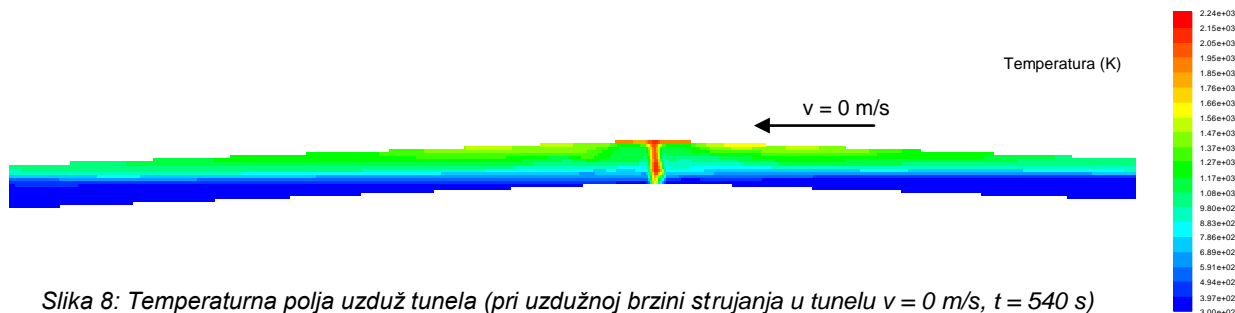
ventilacije, temeljenom na smjernicama RVS-a [3], izvršena je dodatna numerička simulacija požara u tunelu ali pri uvjetima nulte uzdužne brzine strujanja ( $v = 0$  m/s), a sve s ciljem analize fizikalnih polja generiranih u požarnoj zoni. Kao što je spomenuto u prvom dijelu ovog referata, neke od proračunskih ulaznih veličina, kao što je tlak odnosno otpor generiran od strane požara, imaju širok raspon vrijednosti što ulijeva određenu dozu nesigurnosti u cjelokupni proces projektiranja. Kako bi se usporedile preporučene veličine otpora za 30 MW-tni požar (Tablica II) sa rezultatima numeričke simulacije, prikazan je na Slici 7 profil tlaka na liniji simetrije poprečnog presjeka tunela u zoni prije požara ( $z = 658$  m).



Slika 7: Profil rasporeda tlaka u blizini požara (pri uzdužnoj brzini strujanja u tunelu  $v = 0$  m/s)

Zbog povećanja temperaturnog nivoa u zoni požara, te prisutnosti momenta toplih dimnih plinova, dolazi i do povećanja statičkog tlaka, pogotovo pri stropu tunela gdje dimni plinovi dobivaju dodatno uzdužno gibanje, kao što se vidi na Slici 7. U ovom slučaju, za snage 30 MW te ranije prikazanih radnih karakteristika, porast tlaka iznosi nekih 17 Pa. Usporedbom sa podacima iz Tablice II može se zaključiti da je navedeni porast tlaka u skladu sa preporučenim vrijednostima PIARCA [6].

Na Slici 8 prikazan je razvoj temperaturnih polja uzduž tunela u trenutku  $t = 540$  s, te pri uvjetima nulte uzdužne brzine strujanja. U ovom slučaju stratifikacija toplih dimnih plinova simetrična je u oba



Slika 8: Temperaturna polja uzduž tunela (pri uzdužnoj brzini strujanja u tunelu  $v = 0$  m/s,  $t = 540$  s)

dijela tunela, dok je temperaturni nivo u zoni požara znatno viši u odnosu na prijašnje slučajeve (1 te 2,5 m/s) zbog izostanka miješanja toplih dimnih plinova sa uzdužnom strujom svježeg zraka.

## ZAKLJUČAK I BUDUĆI RAD

Na temelju prikazanih rezultata može se općenito zaključiti da su fizikalni procesi od interesa, kao što je stratifikacija i povratno strujanje toplih dimnih plinova, kvalitativno zadovoljavajuće simulirani. U prilog prikazanim rezultatima ide i činjenica da je vrijednost kritične brzine od 2,5 m/s, potrebnom za efikasno sprečavanje povratnog strujanja toplih dimnih plinova (eng. backlayering), jednake vrijednosti kao i kritična brzina prema [1], za jednaku snagu požara od 30 MW. Nadalje, navedena vrijednost kritične brzine u potpunosti se slaže sa njemačkim smjernicama RABT, prema kojima kritična brzina strujanja zraka ( $v_{kr}$ ) za nagib tunela od 1 do 3%, poprečni presjek tunela oblika potkove, te toplinsko opterećenje požara od 30 MW, iznosi 2,6 m/s.

Evidentni nedostatak prikazanih numeričkih rezultata je nepostojanje konkretnih eksperimentalnih mjerenja za tunel Brinje čime bi se inače omogućilo vrednovanje dobivenih rezultata i proširila diskusija o istima.

Također, postoji određena nesigurnost u modeliranju razvoja požara, pogotovo u inicijalnom periodu. Opći dojam je da je prikazani rani razvoj požara relativno spor, što se može dovesti u direktnu vezu sa predefiniranom karakteristikom požara (vidi paragraf 3.3.1). Intenzivniji razvoj požara može se na primjer postići odabirom vrste požara (brzi ili spori), gdje prema [8] količina od 500 litara diesel goriva izgori u potpunosti za nekih 6 minuta (autobus u plamenu), te pri tomu oslobodi toplinu snage nekih 44,4 MW. U navedenom slučaju potrebno je oko 10 sekundi da bi požar dosegao svoj maksimalni intenzitet koji pak traje oko 4 minute, dok je period samogašenja požara procijenjen na oko 2 minute.

Za usporedbu, u ovdje prikazanom primjeru za razvoj požara potrebno je nekih 10 minuta, što ima značajan utjecaj na količinu oslobođene topline i dimnih plinova u vremenu.

Nažalost, zbog limitiranog prostora referata nije bilo moguće prikazati sve rezultate od interesa, kao što su profili brzina u raznim presjecima tunela, koncentraciju dimnih plinova, ili detaljniji prikaz generiranih polja tlaka u području požarne zone, što je od posebnog interesa za postupak klasičnog projektiranja sustava ventilacije.

Prvi zadatak budućih aktivnosti biti će prikladno vrednovanje numeričkog modeliranja sa postojećim

podacima izmjerenih tokom požarnih eksperimenata u tunelu, kao što su test rezultati sa Memorial tunela [17]. Na taj način potvrdila bi se cjelokupna vjerodostojnost numeričkog pristupa te izvršila potrebna kalibracija modela.

Osim toga, mnogi parametri, pretpostavke i pojednostavljena korištena tokom numeričke simulacije zahtijevaju daljnju analizu i vrednovanje. Također i sam scenarij prema kojem je izvršeno numeričkog modeliranja zahtjeva dodatna poboljšanja, kao što je na primjer simulacija stacionarnog strujanja kroz cjelokupnu geometriju tunela pri lokalnim atmosferskim uvjetima na oba portala, dok bi eventualna simulacija požara manjeg segmenta tunela bila provedena koristeći radne parametre iz prethodnog koraka.

Nakon gore navedenih radnji, budući rad obuhvatio bi numeričke simulacije požara u tunelu raznih intenziteta i dinamike požara, čime bi se generirala baza radnih parametara, kao na primjer vrijednosti tlaka (otpora) generiranog u zoni požara, za potrebe klasičnog pristupa projektiranja sustava ventilacije. Dakle, uz pomoću numeričkog modeliranja pokušao bi se smanjiti trenutno široki raspon vrijednosti pojedinih projektnih varijabli koje u postojećim RVS smjernicama za projektiranje nisu egzaktno definirane.

## LITERATURA

- [1] M. Bettelini, CFD for tunnel safety, FLUENT User's Meeting, September 2001
- [2] Pravilnik o tehničkim normativima i uvjetima za projektiranje i gradnju tunela na cestama – SL 59/73, studeni 1973. godine
- [3] RVS 9.261, RVS 9.262, RVS 9.27, RVS 9.280, RVS 9.281 i RVS 9.282
- [4] Europska direktiva 2004/54/EC, Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network, April 2004
- [5] A. Voeltzel, A. Dix, A comparative analysis of the Mont Blanc, Tauren and Gotthard tunnels fires, October 2004
- [6] Norwegian Design Guide, Public Road Administration, Direction of Public Roads, Norway, November 1990
- [7] PIARC Technical Committee C-5, Working group 6, Izvadak iz radnog dokumenta, April 2003
- [8] S. Bari, J. Naser, Simulation of smoke from a burning vehicle and pollution levels caused by traffic jam in a road tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 20, (281-290), September 2004
- [9] A. Kashef, N. Benichou, G. Loughheed, A. Debs, Application of CFD techniques for modelling fire tests in road tunnels, CFD

- 2004, 12<sup>th</sup> Annual Conference of the Computational Fluid Dynamics Society of Canada, Ottawa, May 2004
- [10] A. Bounagui, A. Kashef, N. Benichou, Parametric study on the ventilation configuration for a section of a tunnel in the event of a fire, 3<sup>rd</sup> NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality, Ottawa, December 2003
- [11] S. R. Lee, H. S. Ryou, A numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio, Building and Environment, 41, (719-725), March 2005
- [12] S. S. Levy, J. R. Sandzimier, N. A. Harvey, E. M. Rosenbluth, K. C. Karki, S. V. Patankar, CFD model for transverse ventilation systems, Proceedings of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Escape from Tunnels, Lyon, May 1999
- [13] W. Schwarz, CFD validation for ventilation systems with strong buoyant forces, ASHRAE Winter Meeting: Issues of CFD Applications in Tunnels, Dallas, February 2000
- [14] [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [15] R. C. Hall, Ventilation during road tunnel emergencies, Published Project Report PPR140, August 2006
- [16] V. Yakhot, S. A. Orszag, Renormalisation group analysis of turbulence: I. Basic Theory, Journal of Scientific Computing, 1, (1-51), 1986
- [17] Bechtel/Parson Brinckerhoff: Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program – Test Report, November 1995