Prenos toplote in gibanje zraka med požarom v cestnem predoru

Peter Vidmar, Stojan Petelin

Univerza v Ljubljani Fakulteta za pomorstvo in promet Pot pomorščakov 4, 6320 Portorož **Peter Šavnik** Ministrstvo za promet RS Langusova 6, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Osnovni cilj podane znanstvene razprave je analiza ključnih dejavnikov pri nadzoru in upravljanju požara v cestnem predoru. Simulacija dinamike požara v predoru je izdelana z računalniškim programom FDS (Fire Dynamics Simulator), ki temelji na računski dinamiki fluidov. Model je uporabljen pri simulaciji treh različnih scenarijev: pri prvem modelu je na 200 m izseku predora simuliran požar moči 8 MW z upoštevano dinamiko sproščanja toplote. V drugem in tretjem modelu pa je prikazana aplikacija modela v predoru Kastelec, ki se nahaja na novem odseku avtoceste Klanec-Koper. Model upošteva geometrijo predora, naravno prezračevanje (prepih) in delovanje ventilacijskega sistema z upoštevanimi postopki upravljanja z ventilatorji v primeru požara.

1 UVOD

Požar v predoru je izredno tvegan dogodek, katerega pa verjetnost nastanka ni ravno velika. Požari z velikimi posledicami so najmanj verjetni upoštevajoč varnostno opremo in varnostne ukrepe, ki se uporabljajo v predorih. Evropski direktivi o varnosti v cestnih predorih sledi tudi Slovenija saj naš avtocestni križ predstavlja pomemben del Trans-Evropske cestne mreže. Problematika varnosti pa je v zadnjih letih še veliko bolj v ospredju zaradi tragičnih nesreč, ki so se zgodile v Avstriji, Švici in Italiji.

Izkazalo se je, da je kompleksnost razumevanja dinamike požara v predoru velika in da so enostavni matematični modeli, s katerimi se je skušalo rešiti problem prezračevanja v primeru požara, nezadostno natančni. Hiter razvoj računalniških tehnologij omogoča, da se zahtevni matematični modeli rešujejo na dostopnih osebnih računalnikih. Tu omenjamo predvsem modele, ki temeljijo na računski dinamiki fluidov. Pri tem ima največjo vlogo zahtevnost modela ter velikost izbrane geometrije. Kolikor je mogoče je potrebno geometrijo prilagoditi maksimalno dovoljenemu številu računskih točk, ki ga omejuje kapaciteta računalnika.

Temeljne enačbe, ki jih rešuje CFD (Computational Fluid Dynamics) program FDS, so časovno povprečne Navier-Stoksove enačbe, ki izhajajo iz zakonov o ohranitvi mase, gibalne količine in energije.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + \nabla \cdot \tau \tag{2}$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] - \frac{Dp}{Dt} = -\nabla q_r + \nabla \cdot \lambda \nabla T + q''' + \Phi$$
(3)

Prva enačba je kontinuitetna, druga je vektorska za ohranitev gibalne količine, tretja pa je energijska enačba, kjer pomenijo:

- u- hitrostni vektor v kartezičnem koordinatnem sistemu
- p statični tlak
- Φ disipativna funkcija viskoznosti
- h entalpija
- ρ gostota
- τ viskozni napetostni tenzor
- q toplotni tok
- T temperatura
- λ toplotna prevodnost
- g gravitacijski pospešek

Zgorevanje je pojav, katerega je možno simulirati z ustreznim modelom zgorevanja ali predpisati kot izvor toplote in snovi. Običajno je drugi pristop enostavnejši v kolikor so poznani eksperimentalni podatki o zgorevanju predpisane količine goriva. Prikazani modeli bodo požar v predoru obravnavali kot izvor toplote in snovi, pri čemer je dinamika zgorevanja predpisana na osnovi eksperimentalnih podatkov testa EUREKA 499 [11].

Cilj tovrstnih simulacij je ugotavljanje glavnih parametrov, ki določajo evakuacijske in intervencijske čase. Ti pa so temperatura in koncentracija dima dušljivih in strupenih plinov) v predoru v časovni enoti, pojav vzvratnega toka (beck layering), vidljivost, vpliv ventilatorjev na tok dima (turbulenca) itd. Na osnovi dinamike požara, porasta temperature in nastajanja dima lahko kvantificiramo minimalne evakvacijske in intervencijske čase v katerih je evakuacija uspešna ter intervencija v predoru na mestu požara še možna.

2 RAČUNALNIŠKI PROGRAMI IN MATEMATIČNI MODELI

Računalniških programov za računanje dinamike fluidov je v svetu veliko število. Večina komercialnih so splošni programi s katerimi je možno simulirati večino inženirskih problemov vezanih na obnašanje fluidov. Požar kot fizikalni pojav je možno opisati kot funkcijo dinamike fluidov različnih parametrov. Gibanje fluidov opišemo z ohranitvenimi enačbami, pri čemer upoštevamo lastnosti dinamike toka. Požar v predoru povzroča turbulentno tokovno polje katerega opisujejo Reynoldsove enačbe turbulentnega toka. Ker te enačbe opisujejo zelo širok spekter turbulentnih tokov, ki segajo tudi v področje nadzvočnih hitrosti, je smiselno enačbe prirediti za izbrani problem.

Izbrani računalniški program NIST-FDS (Fire Dynamics Simulator) uporablja prirejeno obliko prenosnih enačb za računanje pod zvočnih prehodnih pojavov, kjer lahko zanemarimo nastanek tlačnih valov. Zgorevalni model imenovan Model mešalnih razmerij je posebno primeren za numerično mrežo, kjer ne računamo disipacijskih procesov, temveč jih modeliramo z ustreznim turbulentnim modelom. Model temelji na računanju zmesi kisika in goriva, katera v stanju ravnotežja izgori in oblikuje površino plamena [14].

2.1 GEOMETRIJA MODELA IN GORIŠČA

Geometrija modela je ustrezno prilagojena potrebam izračuna. Rezultate, ki jih od simulacije pričakujem so dinamika naraščanja temperature v odvisnosti od časa in lokacije na različnih oddaljenostih od požara, koncentracija dima ter vidno polje, višina dimnega oblaka ter vročega sloja. Temperatura na oddaljenosti približno 25 metrov od požara je pomembna s stališča gašenja s hidranti.



Slika 2-1: Geometrija modela predora (splošni prikaz)

Izbrana geometrija predstavlja izsek poljubnega predora v dolžini 200 metrov. Izbrana geometrija je 200 metrov dolžine, 10 metrov širine ter 5 metrov višine predora. Mesto požare je izbrano na polovični razdalji 100 metrov, pri čemer so v geometriji poljubno postavljena nekatera vozila, ki predstavljajo ovire toku. Geometrija je splošna in ne upošteva realnega profila predora saj ocenjujemo, da ta specifika ne bi bistveno vplivala na dinamiko požara in širjenja dima. Prikazanih je pet scenarijev različnih požarov, ki se razlikujejo po velikosti in dinamiki zgorevanja.

2.2 ZAČETNI IN ROBNI POGOJI

Validacija matematičnega modela je prvi korak pri aplikativni uporabi rezultatov simulacij. Ko red velikosti razlike med eksperimentalnimi in računskimi rezultati ne presega 20%-30%, lahko model uporabljamo. Dovoljeno odstopanje je odvisno ob same aplikacije in je pogojeno z vplivom tega odstopanja na rezultate. Ko se prepričamo, da model ustreza zastavljenim mejam odstopanja, so končni rezultati odvisni najbolj od pravilnega predpisovanja začetnih in robnih pogojev.

Izdelani model predora, prikazan na sliki 1, je enak v vseh izvedenih simulacijah z razliko izvora požara, ki ima različno velikost in predpisano toplotno moč. Začetni in robni pogoji so zbrani v tabeli 2-1.

Dinamika sproščanja toplote iz gorišča je določena na osnovi eksperimentalnih podatkov testa EUREKA 499, ki so prikazani na sliki 2-2.



Slika 2-2: Eksperimentalni podatki sproščene toplote med požarom v predoru za različna vozila (EUREKA 499 Report 1996)

Tabela 2-1: Začetni in robni pogoji

Ime	Začetni pogoj	Robni pogoj	
Vhod in	Hitrost enaka nič	Odprti robni pogoj, ki ne predstavlja ovire toku	
Izhod	Temperatura 10 [°] C		
Stene predora	Hitrost na steni enaka nič Temperatura 10 ⁰ C	Inertne stene, kjer ne računamo prevoda toplote skozi steno. V sevalnem modelu so definirane kot črna telesa.	
Vozila v predoru	Hitrost na steni enaka nič Temperatura 10 ⁰ C	Inertni objekti, kjer ne računamo prevoda toplote skozi steno (negorljivi). V sevalnem modelu so definirane kot črna telesa. Predstavljajo oviro toku.	
Temperatura	Temperatura 10 [°] C brez predpisanega	-	
v predoru	temperaturnega profila.		
Hitrosti	Začetna hitrost enaka nič, kjer predpostavljamo naravno prezračevanje.	-	

2.2.1 Simulacije gorenja avtomobila v predoru

- Predpostavljena je največja toplotna moč požara 8 MW
- Povprečna površina vozila oz. sproščanja toplote je 6 m².
- Največja specifična toplotna moč je 1.33 MW/m^2

Dinamiko sproščanja toplote prikazuje Slika 2-3.



Slika 2-3: Predpisana dinamika zgorevanja avtomobila v modelu FDS

Za določanje temperature na različnih oddaljenostih od gorišča, so v modelu vnesena merilna mesta, ki so nameščena na lokacijah, kot prikazuje tabela 2-2 in slika 2-4.

Največja oddaljenost merilnega mesta je 30 metrov od gorišča, ki predstavlja največjo razdaljo od koder je še možno gasiti s hidranti. Predpostavlja se, da je 25 do 30 metrov največji domet iz šobe hidranta v predoru z višino 5 metrov.

Št.	Oznaka senzorja	Oddaljenost od gorišča	
senzorja		Višina [m]	Oddaljenost [m]
1	V:1m_D:10m	1	10
2	V:2.5m_D:10m	2.5	10
3	V:4m_D:10m	4	10
4	V:1m_D:20m	1	20
5	V:2.5m_D:20m	2.5	20
6	V:4m_D:20m	4	20
7	V:1m_D:30m	1	30
8	V:2.5m_D:30m	2.5	30
9	V:4m_D:30m	4	30

Tabela 2-2: Lokacija merilnih mest v modelu požara v predoru



Slika 2-4: Lokacija merilnih mest temperature v predoru

Opazovani rezultati modela se nanašajo predvsem na:

- Sproščeno toploto pri požaru,
- Količino sproščenega dima oz. višino dimnega sloja,
- Temperaturo na višini človeka v odvisnosti od časa,
- Padec dimnega sloja,
- Temperatura na razdalji 25-30 metrov (možnost gašenja s hidranti) in
- Višino vročega sloja.

V modelih, kjer je dinamika sproščanja toplote predpisana z začetnim pogojem gorišča vrednosti HRR (Heat Release Rate) le deloma odstopajo zaradi odvisnosti HRR-ja od zgorevalnega modela. Sproščena toplota v časovni enoti je prikazana na sliki 2-5.



Slika 2-5: Dinamika sproščanja toplote pri simulaciji gorenja avtomobila

Ker so vse spremenljivke časovno odvisne, je prikazovanje temperaturnega polja v predoru nesmiselno, zato so bistveno bolj uporabni rezultati temperature na merilnih mestih. Prikazani so na sliki 2-6.



Slika 2-6: Temperature, izmerjena na merilnih mestih za gorenje avtomobila iz tabele 2-2

Iz slike 2-6 vidimo, da temperatura ne dosega visokih vrednosti, predvsem na višini človeka, ter s tem dopušča evakuacijo in nadaljnjo intervencijo. Drugačno je nastajanjem dima. Dim in saje nista v zgorevalnem modelu produkt reakcije, temveč v modelu dodana. Model upošteva, da se 11% goriva pretvori v saje oz. delce, ki dimu dajejo lastnost zmanjševanja vidljivosti.

Sliki 2-7 in 2-8 prikazujeta polje dima v predoru po 900 sekundah simulacije, ko imam v predoru največjo količino dima.



Slika 2-7: Napolnjenost predora z dimom po 900 sekundah simulacije



Slika 2-8: Vidljivost v predoru na višini 1 meter in oddaljenosti 50 metrov od požara po 900 sekundah simulacije gorenja avtomobila

Čeprav moč požara po 400 sekundah upada se kopičenje dima v predoru povečuje zaradi naravnega prezračevanja, s katerim se odvaja manj dima, kot ga nastane pri zgorevanju. Vidljivost je v modelu določena s prodornostjo svetlobe skozi dim z upoštevanjem eksperimentalnih podatkov o lastnosti dima in sajastih delcev pri izračunani koncentraciji.

Pri simulacijah s področnimi modeli (conskimi) dobimo kot rezultat mejo med vročim (zgornjim) in hladnim (spodnjim) slojem. Pri CFD modelih je to možno s povprečenjem vrednosti oz. definiranjem meje temperature od katere se začne vroči sloj. Izbrali smo vrednost 50°C kot mejno vrednost. Slika 2-9 prikazuje mejo vročega in hladnega sloja pri največji toplotni moči požara.



Slika 2-9: Meja med vročim in hladnim slojem pri največji toplotni moči požara (gorenje avtomobila)

3 SIMULACIJA PREDORA KASTELEC

Zasnova modela je podobna kot v poglavju 2 s to razliko, da geometrija modela bistveno večja in zajema celotno dolžino predora. Ker matematični model zahteva primerno velikost računskih celic je na izbrani geometriji teh celic veliko, bistveno preveč, da bi bila simulacija možna na samostojnem osebnem računalniku. Skupno število računskih celic pri 3D je okoli 2*10⁶, pri 2D pa je 230 000. Po višini in širini je njihova razporeditev enakomerna po dolžini pa je računska mreža zožena v okolici gorišča. Tak pristop je potreben, da so lahko mešalni procesi med zgorevanjem bolj natančno izračunani.

Prikazana sta dva modela, dvodimenzionalni in tridimenzionalni, kjer je osnovna razlika v računskem času ter natančnosti rezultatov.

Dvodimenzionalni model predora Kastelec zajema celotno dolžino predora in njegovo višino. Predpostavke modela so naslednje:

- Dolžina predora: 2280 m,
- Višina predora: 5.7 m,
- Toplotna moč požara: 8MW (Avtomobil) in narašča po standardni krivulji,
- Naklon predora 2.5°
- Začetna hitrost zraka v predoru je 0 m/s,
- Ventilatorji 4 zaporedni-vhodni portal, 3 zaporedni izhodni portal,
- Ventilatorji se vklopijo s postopnim večanjem moči po 5 minutah po začetku požara,
- Povprečna hitrost zraka pred začetkom požara,
- V predoru ni drugih vozil,
- Pred požarom je predor naravno prezračevan.

Stimulacijski čas je 900 sekund (15 min).

Slika 3-2 prikazuje gostoto dima po 15 minutah. Možnost napake zaradi 2D modela je zmanjšana z umerjanjem modela s 3D simulacijo, ki je zaradi tridimenzionalne narave prenosnih enačb bolj natančna od 2D. Osnovni problem nastopi pri večjih gradientih hitrosti,

ki se pojavijo pri povečani turbulenci zaradi uporabe ventilatorjev v modelu, ter večjih toplotnih moči požara. Iz tega izhaja, da je za 2D model sistem slabše pogojen ter slabo konvergira.

Osnovni model je prikazan na sliki 3-2, kjer je za dani scenarij požara prikazan tudi način vključevanja ventilatorjev. Predpostavljeni tok dima je prikazan v smeri vzpona, kar se je izkazalo le delno prav, je pa s stališča intervencije zelo pomemben podatek ali je na zavetrni strani predor čist ali ne.



Slika 3-1: Shema primera obratovanja aksialnih ventilatorjev

Pri simulaciji požara v predoru sta pomembna predvsem dva podatka:

- temperatura ter
- gostota dima.

Zaradi manjše toplotne moči požara je temperatura nižja in ne predstavlja bistvenih težav, medtem ko dim kmalu zapolni osrednji del predora. Vidni spekter dima predstavljajo predvsem sajasti delci, ki nastanejo pri nepopolnem zgorevanju. Osnovna enačba zgorevanja je v modelu podana z $11O_2 + C_7H_{16} \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$ zgorevanjem heptana, ki pa ne vključuje saj, zato so vnesene z dodatno konstanto in sicer 11%, kar je izkustvena vrednost.



Slika 3-2: Gostota dima (saj) po 15 min simulacije [mg/m³]

Levo od mesta požara prihaja do povratnega toka (beck layering) kljub naklonu predora. Po vklopu ventilatorjev pa se med izvorom in ventilatorjem ustvari izredno turbulentno polje, ker ventilator 4 (Slika 3-3) sesa dim, ki prihaja iz povratnega toka. S tem je tudi intervencija s čiste strani predora otežena.

Z modelskega stališča je 2D model manj natančen in daje le nekatere informacije o dinamiki tokov med požarom. Pomembne faze požara kot je povratni tok ter vsesavanje dima v ventilator št. 4 je potrebno preveriti z boljšim modelom.



Slika 3-3: Ojačitev beckleyering-a zaradi ventilatorja 4

3.1 3D MODEL

Model zajema predor Kastelec po celotni dolžini 2280 metrov. Upoštevana je začetna hitrost zraka 2 m/s (naravni vlek), naklon predora ter lokacija in moč aksialnih ventilatorjev. V model so vnesene zakasnilne funkcije, ki ponazarjajo obratovanje predora v primeru požara. Zaporedje dogodkov, ki sestavljajo model je sledeče:



Slika 3-4: Dinamika sproščanja toplote pri požaru ter postopek vključevanja ventilatorjev

Največja toplotna moč požara je 8 MW, kar predstavlja požar osebnega vozila, ter predpostavljamo, da se požar ne širi na druga vozila. Vklop ventilatorjev je predpostavljen po požarnem planu za požar, ki ustreza opisanem scenariju, lokaciji in pogojih prezračevanja. Po požarnem planu se za opisani scenarij po 10-12 minutah vklopijo vsi ventilatorji v smeri navzgor (vzvratno) in prezračujejo predor. Slika 3-5 prikazuje stanje med požarom tik pred vklopom ventilatorjev 600 s, kjer se kljub naklonu in začetni hitrosti pojavlja močan vzvratni tok (backleyering). Slika 3-6 prikazuje stanje ob koncu simulacije, to je po 1800 sekundah. Kljub prezračevanju dim ne doseže izhodnega portala.



Do 600 sekund se dim širi popolnoma neprisiljeno in ga v desno smer potiska le vzgon in naravni vlek. Iz slike 3-5 je razviden povratni tok, ki doseže skoraj 100 metrov dolžine. Ne glede na to je ločen od sloja čistega zraka na spodnjem predelu predora. S stališča evakuacije je to ugodno, saj omogoča pobeg po čistem predelu predora.

Po vklopu ventilatorjev pa se tokovne razmere spremenijo zaradi povečane turbulence. Pojav vsesavanja dima na četrtem paru ventilatorjev je v 3D modelu nekoliko zmanjšan zaradi natančnosti izračuna, je pa kljub temu prisoten.





Vzvratni tok doseže razdaljo okoli 50 metrov, kar je bistveno manj kot pri 2D modelu. 50 metrov ni veliko, moramo pa upoštevati, da je predpostavljeni požar razmeroma majhne toplotne moči. Zaradi podtlaka na sesalni strani ter turbulence na tlačni, kjer se mešata tokova iz ventilatorja in vzvratni tok iz požara, prihaja do vzvratnega toka tudi na spodnjem delu predora. Pojav je razviden iz slike (Slika 3-7), ki prikazuje polje hitrosti v vzdolžni smeri.



Slika 3-7: Polje hitrosti v vzdolžni smeri

Pod tokom, ki ga povzroča ventilator (rdeča barva), je viden negativen tok (modra barva), ki povzroči nastanek dimne zavese med mestom požara in prvim vzvratnim ventilatorjem. Nekatere možnosti za omilitev nastanka povratnega toka pod ventilatorjem se kažejo v urejenem sekvenčnem vključevanju v smeri od portala proti notranjosti predora. Druga možnost se kaže pri določitvi kritične hitrosti toka v predoru za poznano moč požara, kot to nakazuje [Peron]. Samo kot podatek, v modelu s požarom moči 14.4 MW je predvidena hitrost na ventilatorjih 12 m/s, kritične hitrosti pa od 1.5 do 3 m/s. Kritične hitrosti so izračunljive in podane s strani različnih avtorjev kot so [Thomas, Kennedy, NFPA], ob projektiranju oz. varnostni analizi pa je to možno narediti z ustreznimi matematičnimi modeli. Kritična hitrost po definiciji omejuje le spodnjo vrednost hitrosti, ki je potrebna za preprečevanja nastanka povratnega toka. Izkazalo pa se je, da prevelika hitrost na ventilatorjih povzroči prekomerno turbulenco in s tem zmanjša učinek prezračevanja.

Problemi prezračevanje in nadzor požara tudi v svetu še niso rešeni in povsem dorečeni. Aktivnosti potekajo predvsem na naslednjih področjih:

- pomen onesnaževanja znotraj predora in na portalih,
- strategije prezračevanja predorov med normalnim delovanjem in med požarom ter
- izdelava ocen in priporočil za fiksne gasilne sisteme v predorih.

4 ZAKLJUČEK

Članek prikazuje uporabnost matematičnih modelov, ki temeljijo na računski dinamiki fluidov CFD, pri simulaciji razmer v predoru med požarom. Prikazan je splošni model dinamike

gorenja osebnega vozila v predoru, kjer je poudarek na določitvi temperaturnih razmer ter količini proizvedenih produktov zgorevanja. Ugotovljeno je, da pri požaru manjše moči temperatura ne predstavlja posebnih težav, ne s stališča varnosti konstrukcije predora niti s stališča intervencije. Večji problem se kaže v količini proizvedenega dima, ki doseže visoke koncentracije ter izredno zmanjša vidljivost. V nadaljevanju je model postavljen na konkreten problem prezračevanja v predoru Kastelec med požarom. Temeljni zaključki simulacije kažejo na to, da po vklopu ventilatorjev prihaja do izredno ne stacionarnih razmer in močnega vpliva turbulence. Vpliv povratnega toka (beck layering) se po vklopu ventilatorjev zmanjša, vendar se tok dima popolnoma ne preusmeri v vetrno smer. Dobljeni podatki, ter nakazane metode predstavljajo nov korak k poznavanju tokovnih razmer v predorih, predvsem med požarom, ter omogočajo učinkovito načrtovanje upravljanja prezračevanja v kriznih razmerah. Obenem pa rezultati lahko služijo pri poučevanju intervencijskih enot, ki s predhodnim poznavanjem razmer lahko intervencijo izpeljejo učinkoviteje ter z manjšim tveganjem za ljudi in sam predor.

5 LITERATURA

- [1] Fabio Peron, Luca Porciani, Mauro Strada, Fire Ventilation in Road Tunnels: Some Investigations about Critical Air Velocity, Proceedings of the ASME – ZSIS International Thermal Science Seminar II, Bled, Slovenia, June 13 – 16, 2004.
- [2] P. Thomas, The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, n. 723, Fire Research, Station, Watford (UK), (1968).
- [3] W.D. Kennedy, J.A. Gonzalez, J.G. Sanchez, Derivation and Application of the SES Critical Velocity Equations, ASHRAE Transactions: No.102 (2), (1996)
- [4] NFPA, NFPA 502, Standard for Road Tunnel, Bridges and Other Limited Access Highways, National Fire Protection Associations, Quincy, Massachusetts (USA), (1998).
- [5] Peter Vidmar, Fire Spread Model at Traffic Accident Around Nuclear Power Plant, M.Sc., Ljubljana 2003.
- [6] Philip J. DiNenno, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second edition, Society of Fire Protection Engineering, USA-1995.
- [7] Floyd, J.E., Wieczorek, C.J., Vandsburger, U., 2001. Simulation of the Virginia tech fire research laboratory using Large Eddy Simulations with mixture fraction chemistry and finite volume radiative heat transfer, INTERFLAM 2001; Proc. intern. Symp., Edinburgh, 17-19 September 2001:767-778.
- [8] A. Haack, Current safety issues in traffic tunnels, Tunneling and Underground Space Technology 17 117-127 2002.
- [9] Yau, R., Cheng, V., Lee, S., Luo, M. and Zhao, L., 2001. Validation of CFD models for room fires and tunnel fires, INTERFLAM 2001; Proc. intern. Symp., Edinburgh, 17-19 September 2001:807-817.
- [10] M. Bettelini, A. Henke, P. Spinedi, Smoke Management in Longitudinally Ventilated Road Tunnels, EUROTHERM 2002, Turin IT-2002.
- [11] E. Cafaro, L Stantero, Small and large scale tests in road tunnels, EUROTHERM 2002, Turin IT-2002.
- [12] Modic. J., Simulacija požara v predoru, Varstvo pri delu, varstvo pred požari in medicina dela, Portorož 2003.
- [13] VIDMAR, Peter, PETELIN, Stojan. Fire behavior in a road tunnel. V: CAFARO, Emilio (ur.). *Physical and mathematical modelling of fires in enclosures and fire*

protection : proceedings of the Eurotherm Seminar n. 70, Turin (Italy), 7-8 October 2002. Torino, p.p. 193-201.

- [14] McGrattan, K., Baum, H., Rehm, R., Hamins, A., Forney, G.P., Floyd, J.E. and Hostikka, S., 2001. FIRE DYNAMICS SIMU-LATOR - TECHNICAL REFERENCE GUIDE, National Institute of Standard and Technology, NISTIR 6783, 2001.
- [15] Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC Technical Committee on Tunnel Operation, 2004.