

TUNELOVÝ SIMULÁTOR PRE OVERENIE VPLYVU TECHNOLOGIÍ NA EVAKUAČNÉ DOBY

TUNNEL SIMULATOR TO VERIFY THE IMPACT OF TECHNOLOGIES ON EVACUATION TIMES

Juraj Spalek¹, Peter Kello², Igor Milkóšik³

ABSTRAKT

Príspevok je venovaný opisu modelovacieho a simulačného nástroja Tunelový simulátor (TuSim), vyvinutého na Žilinskej univerzite v Žiline (UNIZA), spôsobom využitia a jeho aplikačnému potenciálu. TuSim je určený na analýzu mimoriadnych udalostí v tuneli pri zvolených prevádzkových podmienkach a tiež na hodnotenie vplyvu existujúceho, či alternatívneho technologického vybavenia na bezpečnosť tunela bez fyzickej inštalácie. V príspevku sú prezentované výsledky simulačných experimentov. Ide najmä o analýzu scenárov, rozšírenú o vplyv technologického vybavenia a modelu požiaru i zadymenia s dopadom na celkovú dostupnú dobu evakuácie a celkovú potrebnú dobu pre evakuáciu osôb. Procesy sú ilustrované na časovo-priestorovom priebehu evakuácie v miestach so zvýšenou teplotou a opacitou prostredia. Záver je venovaný uplatneniu simulátora v pripravovanom projekte „Smart tunnel: telematická podpora veliteľovi zásahu pri mimoriadnych udalostiach v cestnom tuneli“.

ABSTRACT

The contribution describes a modelling and simulation tool called The Tunnel Simulator (TuSim), developed at the University of Žilina (UNIZA). It considers its uses and its application potential. TuSim is designed to analyse critical tunnel events, under given operating conditions, and also to evaluate the influence of the existing, or alternative technological equipment onto the safety of the tunnel, and without the need for physical installation of the equipment. The paper presents results of simulation experiments. These include especially scenario analyses, extended with the influence of technological equipment, and analysis of the fire and smoke model with an impact on the total evacuation time available and on the total evacuation time necessary to evacuate all persons. The processes are illustrated using a spatio-temporal evacuation plot in the areas with increased temperature and opacity. The conclusion considers the uses of the simulator in the “Smart tunnel: telematic support for emergencies in the traffic tunnel” project, which is now in the stage of preparation.

¹Prof. Ing. Juraj Spalek, PhD., Katedra riadiacich a informačných systémov, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina. Tel.: 041/513335501, e-mail: juraj.spalek@fel.uniza.sk

²Ing. Peter Kello, Katedra riadiacich a informačných systémov, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Ul. Univerzitná 8215/1, 010 26. Tel.: 041/513335501, e-mail: peter.kello@fel.uniza.sk

³Ing. Igor Miklóšik, PhD., ELTODO SK, a.s., Závodská cesta 24, 010 01 Žilina. Tel.: 02 / 208 631 87, e-mail: miklosik.igor@gmail.com

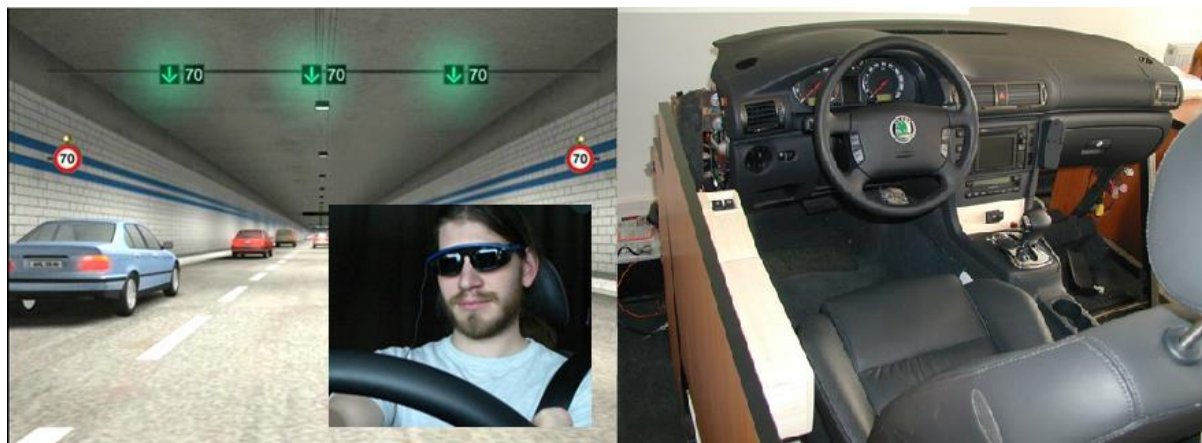
1 Úvod

Tunelové trenažéry sa vo svete používajú na školenie tunelových operátorov. Sú zamerané najmä na vizualizáciu tunela pomocou virtuálnej reality (Obr. 1), pričom na overovanie správnosti riadiacich algoritmov sú určené simulátory na báze programovateľných logických automatov (PLC) [Pos 2007]. Ako príklad možno uviesť Driving Simulators: Roadway Design and Visualization podľa Federal Highway Administration (US Department of Transportation), či školiace tunelové zariadenie, inštalované na Stavebnej fakulte UNIZA, ako súčasť Centra výskumu v doprave.



Obr. 1 Príklad simulátora podľa [Pri 2014]
Fig. 1 The simulator example by [Pri 2014]

Iný druh simulátora slúži na podporu výučby vodičov pri prejazde tunelom. Zariadenie tohoto typu nemusí slúžiť výlučne na výučbu, možno analyzovať ich správanie sa pri prejazde tunelom, či pri výskyte nehody v ňom (Obr. 2).



Obr. 2 Príklad simulátora podľa [Při 2007]
Fig. 2 The simulator example by [Při 2007]

Na overenie správnosti riadiacich algoritmov sú používané simulátory na báze PLC. Simulátory toho druhu slúžia na modelovanie, analýzu a predikciu mimoriadnych udalostí v tuneli alebo na hodnotenie vplyvu technologického vybavenia na plynulosť a bezpečnosť premávky bez fyzickej inštalácie.

2 Tunelový simulátor TuSim

V rámci projektu „Centrum excelentnosti pre systémy a služby inteligentnej dopravy“ ITMS 26220120028 a ITMS 26220120050, spolufinancovaných zo štrukturálnych fondov EÚ v rokoch 2009–2013, vzniklo na UNIZA komplexné riešenie TuSim. Prvá verzia (Obr. 3), vyvinutá ELTODO, a.s., Praha a PPA INŽINIERING, s.r.o., Bratislava, je umiestnená na Katedre riadiacich a informačných systémov, ktorá je súčasťou Elektrotechnickej fakulty (EF) UNIZA. Ide o komplexné HW/SW riešenie, založené na priemyselnom PC vo funkcii PLC od firmy B&R Automation. Opis modulov zhora nadol: Masterview LCD switch-u vizualizačný server, B&R Automation PC (na obrázku vľavo dole) a záložná UPS jednotka (na obrázku vpravo dole). Základné simulačné a analytické pracovisko je na Obr. 4.



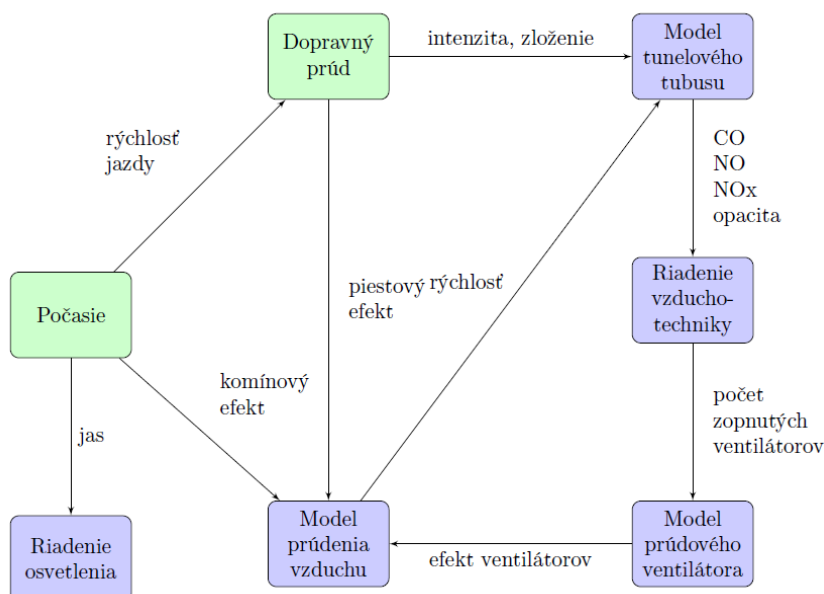
Obr. 3 Technické vybavenie TuSim-u
Fig. 3 Technical equipment of the TuSim



Obr. 4 Simulačné pracovisko TuSim-u
Fig. 4 Simulation workplace of the TuSim

V PC je emulované PLC typu Siemens S7-400, kde sú simulované aj technologické komponenty tunela. TuSim umožňuje simuláciu troch typov tunelov dĺžky 1 000 m: mestský tunel (MST), diaľničný jedno-tubusový tunel (D1T), diaľničný dvoj-tubusový tunel (D2T). Vizualizáciu technologického vybavenia zabezpečujú HMI/SCADA obrazovky. Celý systém má otvorený softvérový koncept pre ďalšie rozširovanie od úrovne softvéru v PLC až po dizajn grafických obrazoviek. Simulátor nie je pripojený k dátovému toku reálneho tunelu. HMI server sa stará o zber, archiváciu a distribúciu dát z PLC klientov. Výber dát na archiváciu v databáze na serveri je konfigurovaný nástrojom Database Logger, dáta môžu byť následne zobrazené na všetkých klientoch. Klienti okrem zobrazenia dát umožňujú aj vykonávanie riadiacich zásahov v samostatných obrazovkách pre každý technologický subsystém. Na zobrazenie a zmenu obrazoviek sa používajú nástroje CimViewer a CimEdit z HMI/SCADA CIMPLICITY softvéru. Použitá verzia OPC servera má licenciu na dve spojenia pre klientov vo VPN sieti simulátora. PLC je z dôvodov verifikácie modelov možné prepojiť s inými nástrojmi spôsobmi: XML rozhranie od firmy ELTODO, Libnodave DLL knižnica, MATLAB/SIMULINK a tiež IDA RTV [Mik 2016].

TuSim bol v pôvodnej verzii trenažérom s pevnými parametrami, určeným na oboznámenie sa obsluhy s riadiacim systémom tunelu a na manuálnu simuláciu mimoriadnych udalostí pomocou reflexov. Neobsahoval modely, potrebné pre simuláciu technologickej variability tunelových systémov. Tie bolo treba doplniť implementovaním viacerých matematických modelov. Na Obr. 5 sú finálne moduly, dôležité pre základnú funkcionálnu a interakcie medzi nimi. Moduly v modrých poliach sú implantované priamo na úrovni PLC, ostatné na HMI/SCADA úrovni.



Obr. 5 Moduly rozšíreného simulátora TuSim [Mik 2016]

Fig. 5 Expanded simulator modules of TuSim [Mik 2016]

Matematické modely a príklady ich použitia sú uvedené v [Mik 2016]. Pre odhad rýchlosti pohybu osôb evakuačného modelu bol navrhnutý nasledujúci fuzzy inferenčný systém (FIS) s nasledujúcimi parametrami:

- hustota osôb (na evakuačnom chodníku) - malá (< 1,5 os/m²), stredná, veľká (> 4 os/m²);
- zadymenie priestoru - malé (< 2 /m), stredné, veľké (> 6 /m);
- osvetlenie (úroveň prevádzkového osvetlenia) - nízka (< 25 %), stredná, vysoká (> 70 %).

Všetky funkcie príslušnosti boli zvolené v prvom kroku trapezoidálne a lingvistické premenné boli odčítané expertne. Ukázalo sa, že je možné dosiahnuť menšiu odchýlku od experimentálnych údajov pri ladení tvaru funkcií príslušnosti genetickými algoritmi, porovnanie rôznych prístupov je uvedené v [Gre 2016] a [Kel 2017]. Na verifikáciu evakuačného modelu boli použité údaje z [Ron 2012], kde je detailné porovnanie viacerých evakuačných nástrojov. Vybrané experimenty boli zopakované na báze uvedeného evakuačného modelu. Porovnanie vstupných údajov pre experimenty je v Tab. 1

Tab. 1 Porovnanie evakuačného modelu TuSim s modelom podľa [Ron 2012] – vstupné údaje

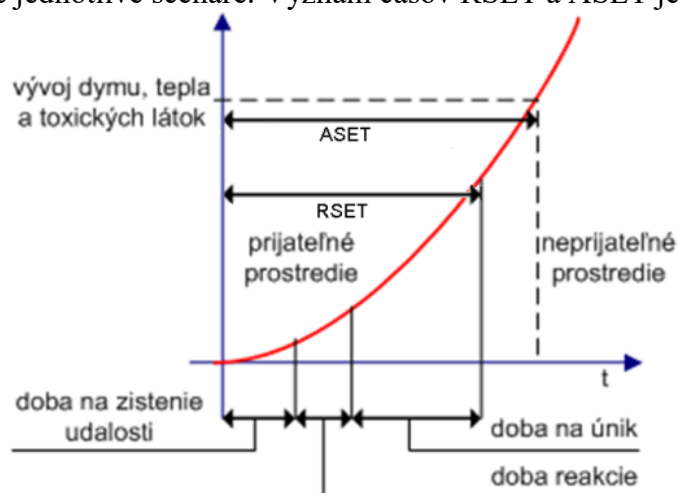
Tab. 1 Comparison of the TuSim evacuation model with the model by [Ron 2012] – input data

	Ronchi	TuSim
Dĺžka tunela	670 m	675 m
Vzdialenosť únikového východu	390 m	390 m
Šírka chodníka	2,5 m, 0,75 m	1,5 m, 1,5 m
Dĺžka vozidla	Osobné: 4,5 m + medzera 1 m Nákladné: 10 m	7,5 m s medzerou
Počet osôb vo vozidle	Osobné: 2,5 - 5 Nákladné: 1 - 2	Osobné: 3 - 6 Nákladné: 1 - 2
Počet osôb v tuneli	A1.1, A2.2: 312 osôb, A2.1, A2.1, A2.3: 624 osôb	Variabilný ~ 300 Variabilný ~ 600

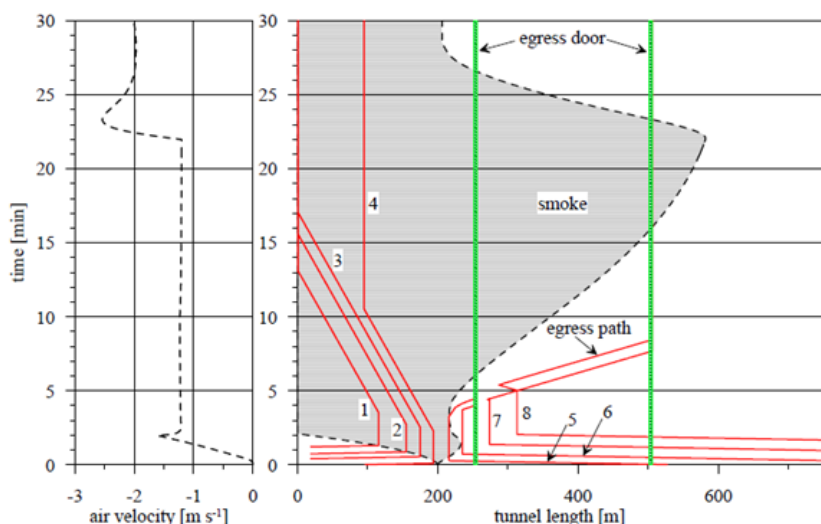
Pre všetky scenáre bola použitá jednosmerná doprava, zastavená pri únikovom východe bez zapnutej ventilácie. Zo zdroja [Ron 2012] boli realizovali scenáre A1.1, A1.2 a A2.1 - A2.3. Prvé dva simulovali bežný priebeh evakuácie s jej okamžitým zahájením, ďalšie boli testy rôznej rýchlosti pohybu osôb.

3 Simulácia evakuácie pri požiari

Ukázalo sa, že na hodnotenie scenárov je vhodné použiť porovnanie parametrov ASET (The Available Safe Egress Time) a RSET (The Required Safe Egress Time), prípadne odhady mortality pre jednotlivé scenáre. Význam časov RSET a ASET je na Obr. 6.



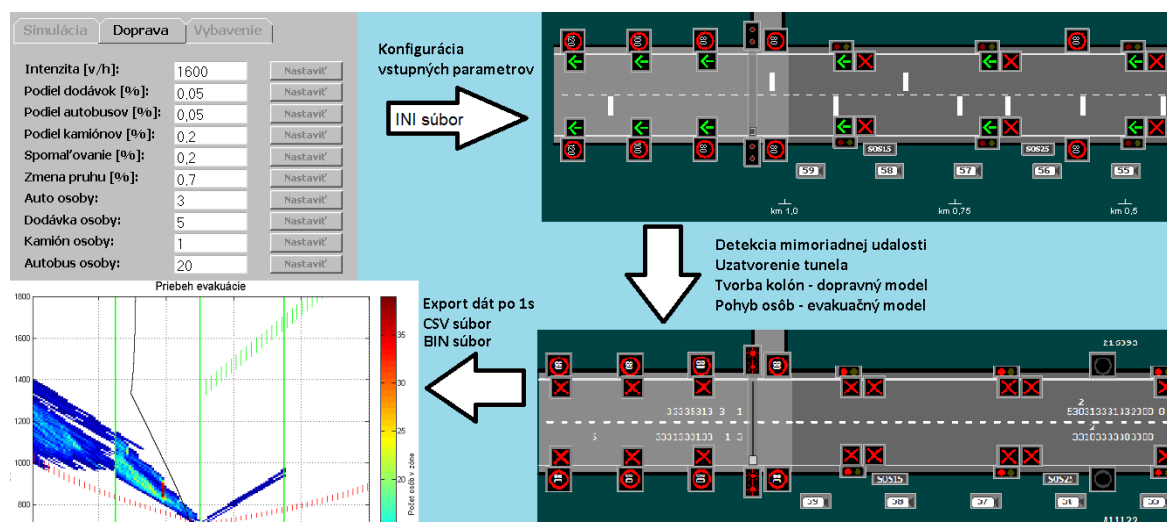
Obr. 6 Ilustrácia významu časových parametrov RSET a ASET [Mat 2013]
 Fig. 6 Illustration of time parameters meaning RSET a ASET [Mat 2013]



Obr. 7 Grafický výstup simulácie šírenia dymu a únikových ciest [Rie 2012]
 Fig.7 Graphics output of simulation of smoke propagation and escape routes [Rie 2012]

Na Obr. 7 je názornejší časovo-priestorový spôsob vizualizácie časov RSET/ASET [Rie 2012], kde nie je problém posúdiť situáciu na konkrétnom mieste v tuneli. V ľavej časti obrázka je uvedený priebeh rýchlosti prúdenia vzduchu, v pravej časti je šírenie dymu. Červené čiary zobrazujú pozíciu únikových ciest k jednotlivým východom.

Postup simulácie v TuSim je na Obr. 8, nastavenie parametrov simulácie je v ľavej hornej časti obrázka. V pravej hornej časti obrázka je priebeh simulácie bez zastavenia dopravy, v pravej dolnej časti je simulácia zastavenia dopravy a priebeh evakuácie osôb.



Obr. 8 Cyklus simulačného experimentu v TuSim
Fig. 8 Simulation experiment cycle in TuSim

Pre simulované scenáre boli stanovené rovnaké podmienky:

- zastavenie jednosmernej dopravy s intenzitou 1600 voz/h v 5. minúte simulácie,
- reakcia riadiaceho systému v 10. minúte simulácie.

Z hľadiska efektívnosti vetrania boli dôležité hraničné scenáre:

- najlepší prípad (zapnutie troch párov ventilátorov)
- najhorší prípad (nezapnutie žiadneho ventilátora).

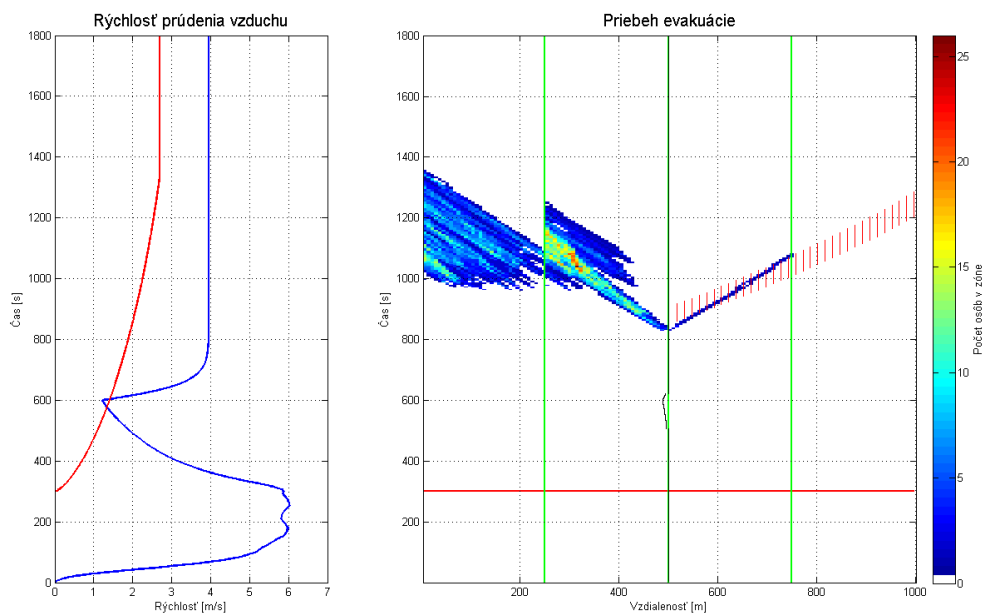
Pre automatické zahájenie evakuácie bolo použitá podmienka zvýšenia teploty nad 45 °C alebo prítomnosť dymu v mieste výskytu osôb. Ak sa neuplatnilo ani jedno z pravidiel, zahájila sa evakuácia v 15. minúte simulácie s penalizáciou času podľa vzdialenosti od miesta požiaru. Pri každom scenári bol zobrazovaný časo-priestorový spôsob vizualizácie časových parametrov RSET/ASET, kde červeným šrafovaním je zobrazená hodnota teploty vzduchu 50-55 °C.

Na Obr. 9. je vidno, že pri požari nákladného vozidla rýchlosť prúdenia krátko klesne pod odhadovanú hodnotu kritickej rýchlosti a môže dôjsť krátkodobo k spätnému šíreniu dymu. Zvýšená teplota spôsobí skoršie zahájenie evakuácie, teplota 50 °C dosiahne únikový východ za požiarom približne v 16. minúte a ak by osoby evakovali v nesprávnom smere, boli by okrem dymu ohrozené aj teplotou.

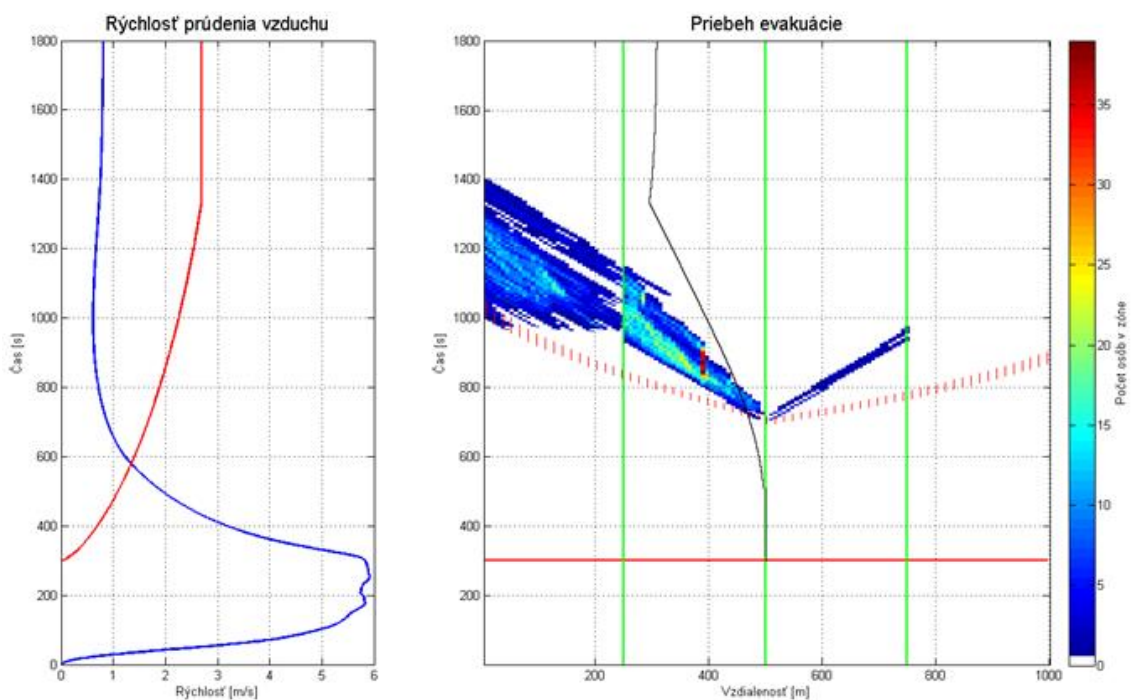
Na Obr. 10. je znázornený priebeh požiaru nákladného vozidla pri vypnutej ventilácii, kde spätné šírenie dymu nedosiahne únikový východ pred miestom požiaru z dôvodu zvýšenia rýchlosti prúdenia vzduchu tesne k hodnote 1 m/s, osoby ukončia evakuáciu v čase 1404 sekúnd. Teplota 50 °C dosiahne únikový východ za miestom požiaru približne v 13. minúte, únikový východ pred miestom požiaru približne v 14. minúte a celá evakuácia osôb by bola realizovaná v prostredí so zvýšenou teplotou.

Autor [Per 2012] ráta s jednorozmerným modelom požiaru a pre mortalitu použil výpočet FED a FID, pre scenáre požiaru vozidiel mu vyšla nulová mortalita, k úmrtiam došlo až pri požiaroch nebezpečného nákladu, resp. požiaroch s takmer okamžitým nárastom na maximálny výkon, čo je v prípade funkčnej ventilácie v súlade s našimi zisteniami.

Zvýšená teplota nemusí okamžite spôsobiť neschopnosť osôb vykonať evakuáciu, rovnako ako spätné šírenie dymu pod stropom tunela neohrozí osoby hneď, dym sa až po čiastočnom ochladení bude miešať so spodnými vrstvami vzduchu a tento efekt jednorozmerné modely nedokážu zohľadniť.



Obr. 9 Priebeh evakuácie pri požiari nákladného vozidla pri zapnutej ventilácii [Mik 2016]
 Fig. 9 Evacuation procedure when the truck is fired and the ventilation is switched on [Mik 2016]



Obr. 10 Priebeh evakuácie pri požiari nákladného vozidla pri vypnutej ventilácii [Mik 2016]
 Fig. 10 Evacuation procedure when the truck is fired and the ventilation is switched off [Mik 2016]

Trojrozmerné simulácie procesov v tuneli Horelica [Osv 2014] ukázali, že teplota proti smeru prúdenia vzduchu vo výške 1,8 m nie je pre osoby nebezpečná ani v jednom zo scenárov. Uvedené hodnoty neplatia pre bezprostredné okolie požiariu, t.j. do 10 m pred a za miestom vzniku požiariu. V smere prúdenia bola teplota 50 °C prekročená po celej dĺžke tunelovej rúry pre požiari 20 MW a 50 MW, čo korešponduje s našimi výsledkami pri nižšej rýchlosti prúdenia vzduchu. Pri 50 MW požiari ohrozovala radiácia nad úroveň 2,5 kW/m² osoby najviac 25 m v smere prúdenia a 10 m proti smeru prúdenia, čo je v súlade s nami vypočítanou hodnotou 25,69 m pre rovnakú radiáciu a požiari [Mik 2016].

Z toho vyplýva, že pri 1 km dlhom tuneli sa dá udržať prúdenie vzduchu v smere dopravy len vtedy, ak detekcia požiaru a následné spustenie ventilácie bude realizované v čase do 5 minút od zastavenia dopravy. V prípade správnej funkcie detekcie požiaru a ventilácie a bez iracionálneho správania osôb - evakuácia nesprávnym smerom, zotrvanie vo vozidle, by pri jednosmernej premávke nemalo dochádzať k usmrteniu osôb.

Pri obojsmernej premávke bude časť osôb evakuovať v zadymenom prostredí, vypnutie ventilácie pri krátkych tuneloch môže byť z dôvodu zmeny smeru prúdenia vzduchu problémové a prípadná regulácia na danú hodnotu rýchlosti prúdenia, napr. konkrétna hodnota 0 alebo 1 m/s podľa technických podmienok môže byť bez frekvenčných meničov ťažšie dosiahnuteľná.

4 Záver

Vlastnosti TuSim-u boli vedecky zdôvodnené a simulačne overené v rámci dizertačnej práce spoluautora tohto príspevku [Mik 2016] a ďalej rozpracované ďalším spoluautorom tohto príspevku Ing. Petrom Kellom v pripravovanej dizertačnej práci „Optimalizácia technologického vybavenia cestných tunelov pre dosiahnutie akceptovateľnej úrovne bezpečnosti“ (2016 - 2018). Práce súvisia s vedeckovýskumnou činnosťou Katedry riadiacich a informačných systémov EF UNIZA.

Vedecké tímy z EF UNIZA a Fakulty bezpečnostného inžinierstva UNIZA v súčasnosti pracujú na využití TuSim v pripravovanom projekte aplikovaného výskumu, podporovaného výskumnou agentúrou APVV, s názvom „Smart tunnel: telematická podpora veliteľovi zásahu pri mimoriadnych udalostiach v cestnom tuneli“. Ide o predprípravu scenárov po výskyte mimoriadnej udalosti v konkrétnom tuneli, ktorého stavebno-technologické i prevádzkové parametre v najnepriaznivejších podmienkach (napr. umiestnenie a tepelný výkon a druh požiaru, počet a smer pohybu osôb a pod.) sa dajú nasimulovať s vysokým stupňom izomorfizmu. Výsledky simulácií budú poskytnuté v multimediálnej forme v reálnom čase veliteľovi zásahu na spresnenie riadenia zásahovej jednotky Integrovaného záchranného systému s dôrazom na Hasičský a záchranný zbor Slovenskej republiky (HaZZ SR), a tým aj na zrýchlenie a zefektívnenie jeho rozhodnutí. Medzi aplikačné ciele projektu ďalej patria:

- prenos relevantných informácií pre zásahové zložky a komunikácia veliteľa zásahu s operačným strediskom tunela – požiadavky na dáta (zdroj, rozsah, formát, časová platnosť, prenos, zabezpečenie, fúzia, dolovanie,...),
- vytvorenie scenárov mimoriadnych udalostí a ohrozenia účastníkov cestnej premávky v tuneli na základe analýzy dostupných štatistických údajov zásahovej činnosti zložiek IZS,
- vytvorenie a experimentálne overenie celkovej funkčnosti nového modulárneho systému pre telematickú podporu pri mimoriadnych udalostiach (od konceptu až po UML model SW riešenia), vhodného pre realizáciu komerčných riešení na základe pripomienok budúcich používateľov - MV SR / Prezídium HaZZ SR, NDS, a.s., príp. ďalších,
- prepojenie výsledkov procesu s legislatívnymi návrhmi pre zmenu a/alebo tvorbu predpisov v danej oblasti a návrh systémov, ktoré by sa zaoberali návrhom ochranných opatrení riešiacich problematiku úmyselného útoku v dopravných tuneloch a príslušných okolí a špecifikácia preventívnych ochranných opatrení, ktoré riešia zníženie pravdepodobnosti vzniku takýchto nebezpečenstiev.

Taký postup sa osvedčí zvlášť v situáciách, kedy v oblasti zásahových aktivít jednotky existuje viacero cestných tunelov (napr. na území ŽSK ich je plánovaných 10, z toho v správe SSÚD Lietavská Lúčka bude 7) a počas príjazdu na miesto zásahu sa veliteľ oboznamuje s aktuálnou situáciou v ohlásenej oblasti zásahu a operatívne riadi ostatných členov jednotky.

Literatúra

- [Gre 2016] Gregor, M. - Miklóšik, I. - Spalek, J.: Automatic Tuning of a Fuzzy Meta-model for Evacuation Speed Estimation, zborník z konferencie SSKI, Levoča, 2016
- [Kel 2017] Kello, P. - Gregor, M. - Miklóšik, I. - Spalek, J.: Learning a Fuzzy Model for Evacuation Speed Estimation using Fuzzy Decision Trees and Evolutionary Methods, TST 2017, Ustron, Poľsko
- [Mat 2013] Matis, P. – Spalek, J., Fuzzy model doby reakcie osôb v cestnom tuneli pri vzniku mimoriadnej udalosti, ATP Journal Plus 2/2013, Bratislava, ISSN 1336-5010, 2013
- [Mik 2016] Miklóšik, I., Pokročilé metódy kvantifikácie bezpečnosti cestných tunelov. Dizertačná práca, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, 2016
- [Osv 2014] Osvald, A. - Mózer, V. - Svetlík, J., Požiarna bezpečnosť cestných tunelov, Žilina: EDIS, ISBN: 978-80-554-0950-4, 2014
- [Per 2012] Persson, M., Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, ISSN: 1402-3504, 2002
- [Pos 2007] Pospíšil, P.: Přejímací zkoušky systémů větrání tunelů, Tunel č. 4/2007, ISSN 1211–0728, časopis ITA/AITES, s. 38-43
- [Pri 2014] Prikryl, J. - Šilar, J. - Šmerda, T.: Tunelový trenažér TOMMS, Tunel 3/2014, ISSN 1211–0728, časopis ITA/AITES, s. 24-31
- [Při 2007] Příbyl, P.: Silniční tunel jako součást telematického systému, Prednášky z predmetu Inteligentné dopravné systémy (ŠP Riadenie procesov v rámci ŠO Automatizácia, Katedra riadiacích a informačných systémov, EF UNIZA, 2007
- [Rie 2012] Riess, I. R. - Brandt, R.: ODEM: A One-dimensional Egress Model for Risk Assessment, Graz: 5th International Conference Tunnel Safety and Ventilation, 2012
- [Ron 2012] Ronchi, E.: Evacuation Modelling in Road Tunnel Fires, Doctoral Thesis, Polytechnic University of Bari, 2012.

This contribution is the result of the project implementation:

Centre of excellence for systems and services of intelligent transport, ITMS 26220120050 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.



"Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ"