

PRVÉ INFORMÁCIE O PROJEKTE APVV: EXPERIMENTÁLNE SKÚMANIE A POČÍTAČOVÉ MODELOVANIE PRÚDENIA VZDUCHU PRI POŽIARI V CESTNOM TUNELI

P. Danišovič

Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Žilina, Slovenská republika

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá prvými informáciami o projekte podporenom Agentúrou na podporu výskumu a vývoja APVV-24-0429 s názvom Experimentálne skúmanie a počítačové modelovanie prúdenia vzduchu pri požiari v cestnom tuneli. Projekt sa začal riešiť na jeseň 2025. Na projekte spolupracujú riešitelia z Ústavu informatiky Slovenskej akadémie vied a Žilinskej univerzity v Žiline. Riešitelia sa budú primárne zaoberať interakciou činnosti núdzového vetrania, meteorologických faktorov a požiaru v reálnom tuneli, s cieľom vytvoriť sériu počítačových simulácií požiarov v dvoch diaľničných tuneloch. Simulácie budú overené pomocou meraní in situ. Sekundárne sa budú zaoberať aj mimoriadnymi udalosťami v tuneloch, ich evidenciou a vyhodnocovaním v rámci Slovenska. Jedným z výstupov projektu bude návrh a realizácia úprav Simulátora riadenia tunelov v súlade s aktuálnou legislatívou, ktoré posilnia jeho jedinečnosť v stredoeurópskom priestore a zlepšia jeho využívanie na výskumné a vzdelávacie účely. Veríme, že realizácia projektu umožní zintenzívniť a zefektívniť výskumnú spoluprácu riešiteľov projektu, vytvoriť silné partnerstvo riešiteľských organizácií s významnými odberateľmi výsledkov projektu a efektívne využiť modernú výskumnú infraštruktúru zúčastnených pracovísk na vytvorenie inovatívnych riešení na zvýšenie bezpečnosti cestných tunelov.

1. ÚVOD

Projekt APVV-24-0429 s názvom Experimentálne skúmanie a počítačové modelovanie prúdenia vzduchu pri požiari v cestnom tuneli (ďalej len projekt) vo svojej podstate nadväzuje na predchádzajúci projekt APVV-15-0340 s názvom Modely vzniku a šírenia požiarov na zvýšenie bezpečnosti cestných tunelov, ktorý sa úspešne riešil v rokoch 2016 až 2019. Tento predchádzajúci projekt sa zaoberal modelovaním komplexných procesov súvisiacich s požiarom pomocou CFD technológie, vytvorením série počítačových simulácií scenárov požiarov v dvoch cestných tuneloch a skúmaním vhodného spôsobu paralelizácie výpočtu simulácie s cieľom dosiahnuť podstatné zrýchlenie výpočtu bez negatívneho vplyvu na presnosť výpočtu. Ďalším cieľom bol výskum vplyvu požiarnej ventilácie na vrstvenie dymu v tunelovej rúre a vykonanie experimentov v dvoch cestných tuneloch in situ. Dôležitými výstupmi boli aj vizualizácie stratifikácie dymu pri požiari vo virtuálnom tuneli Simulátora riadenia tunelov vytvorené počítačovou simuláciou na báze CFD modelov. Významným prínosom predchádzajúceho projektu pre simuláciu požiarov v stredne dlhých cestných tuneloch boli okrem iných zistenia o úlohe variability dynamického tlaku na portáloch tunela na rýchlosť prúdenia a na šírenie dymu v tuneli. Toto zistenie sa stalo jedným zo základných cieľov pre vznik a podanie nového projektu.

2. PILIERE PROJEKTU Z PREDCHÁDZAJÚCEHO OBDOBIA

Pre zrozumiteľnejšie vysvetlenie nadväznosti a súvislostí projektov uvádzame niektoré vybrané piliere, na ktorých je založený nový projekt, ktorého dôležitou súčasťou je napr. aj Simulátor riadenia tunelov.

2.1 SIMULÁTOR RIADENIA TUNELOV

Simulátor riadenia tunelov (ďalej len simulátor) je jedným z výstupov projektu zameraného na aplikovaný výskum nových technológií na zvýšenie bezpečnosti prevádzky cestných tunelov. Konkrétne je výstupom projektu s názvom Centrum výskumu v doprave s ITMS kódom 26220220135

financovaného z Operačného programu Výskum a vývoj 2009 v zmysle opatrenia 2.2 Prenos poznatkov a technológií získaných výskumom a vývojom do praxe.

Simulátor (Obr. 1) predstavuje Centrálny riadiaci systém (CRS) virtuálneho dvojrúrovňového diaľničného tunela dĺžky 1 km doplneného o simuláciu premávky v tuneli. Na zobrazovacej stene sú umiestnené dva veľkoplošné LED panely znázorňujúce prehľad stavu najdôležitejších technologických zariadení tunela od prilahlých križovatiek. Pod nimi sa nachádzajú monitory zobrazujúce virtuálnu simuláciu dopravy v oboch tunelových rúrach. Operátor si môže zvoliť zobrazenie ľubovoľnej kamery zo všetkých 42 kamier, ktoré zabezpečujú dokonalý prehľad nad virtuálnou premávkou v tuneli.



Obrázok 1: Simulátor riadenia tunelov na Žilinskej univerzite v Žiline

Simulátor je určený pre riadenie dvoma operátormi a jeho nevyhnutnou súčasťou je aj pracovisko koordinátora simulácie (Obr. 2).



Obrázok 2: Pracovisko koordinátora simulácie

Z tejto pozície môže koordinátor iniciovať rôzne simulácie mimoriadnych udalostí (Obr. 3) v premávke tunela:

- pomaly idúce vozidlo, ktoré vytvára kolónu vozidiel v tunelovej rúre,
- zastavenie vozidla v jazdnom pruhu s možnosťou následnej dopravnej nehody a požiaru,
- zvierat (pes) v tuneli s možnosťou následnej zrážky vozidla so zvieratkom,
- chodec v tuneli s možnosťou následnej zrážky chodca vozidlom,

- zastavenie vozidla s označením ADR (vozidlo prevážajúce nebezpečné veci) s možnosťou následného úniku nebezpečnej látky alebo vzniku požiaru,
- vypadnutý predmet na vozovke s možnosťou následnej zrážky s vozidlom a/alebo vznik požiaru,
- vypadnutý predmet (sud) a únik chemickej látky,
- demonštrácia ľudí v tuneli,
- hrozba teroristického útoku,
- vozidlo v protismere,
- nadrozmerné vozidlo blokujúce vjazd do tunela,
- zastavenie autobusu v jazdnom pruhu a následný nadmerný pohyb ľudí v tuneli,
- dopravná nehoda dvoch vozidiel s možnosťou následného požiaru.



Obrázok 3: Vzorové simulácie mimoriadnych udalostí vo virtuálnom tuneli simulátora

Simulačné možnosti koordinátora nie sú obmedzené len na simulovanie mimoriadnych udalostí v premávke tunela, ale umožňujú mu simulovať rôzne štandardné a neštandardné javy, zlyhania/poruchy/straty diaľkového ovládania technologického vybavenia, ktoré je možné ovplyvniť nasledujúcimi zmenami:

- fyzikálnych hodnôt (opacity/viditeľnosti, úrovne CO, jasu, teploty, rýchlosti prúdenia vzduchu) vzhľadom na aktuálne podmienky,
- intenzity premávky (sporadická, normálna, stop and go, kolóny),
- prevádzkových parametrov (deň, noc, hmla, smog),
- vývoja video-simulácie v podobe núdzových a iných volaní (z SOS kabíny, s mechanikmi údržby tunela, so zložkami integrovaného záchranného systému a inými oprávnenými osobami),
- stavu technologických zariadení v tuneli (porucha alebo iná chyba kamier, snímačov, dopravných značiek, napájania, atď.).

2.2 EXPERIMENTY IN SITU A MERACIE PRISTROJE

V rokoch 2017 až 2021 sa nám podarilo uskutočniť jedno sieťové meranie prúdenia vzduchu v tuneli Poľana počas simulovaného požiaru, tri samostatné merania smeru a rýchlosti prúdenia na portáloch tunelov Poľana, Považský Chlmec a Ovčiarsko a jedno meranie prúdenia vzduchu vo vzduchotechnickom kanáli tunela Branisko.

Najrozsiahlejším experimentom in situ bolo sieťové meranie (Obr. 4) v tuneli Poľana, v tuneli s obojsmernou premávkou dĺžky približne 900 m s pozdĺžnym systémom vetrania principiálne založenom na udržiavaní maximálnej rýchlosti ($2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) prúdenia vzduchu v tuneli počas požiaru.



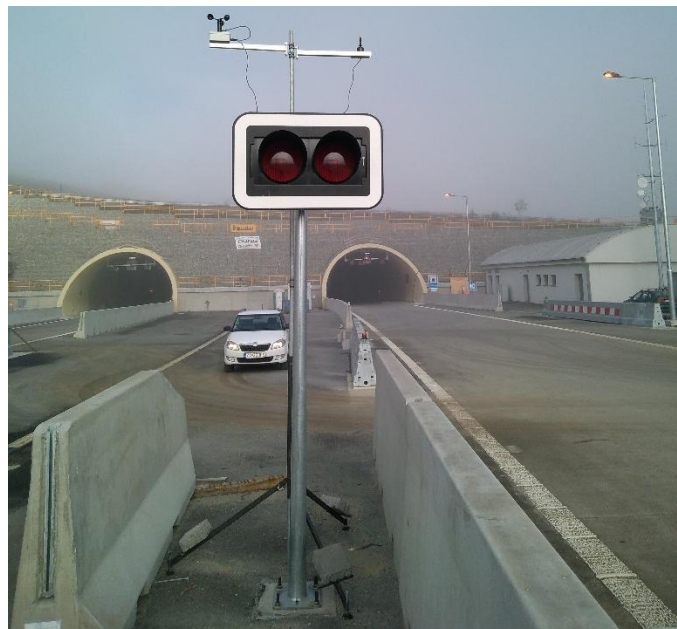
Obrázok 4: Sieťové merania prúdenia vzduchu v tuneli Poľana

Experiment bol zameraný na sledovanie/skúmanie stratifikácie dymu (studeného dymu – aerosólu, Obr. 5) a vplyvu vetrania na udržiavanie a narušenie stratifikácie. Narušenie stratifikácie dymu bolo predpokladané (na základe počítačových simulácií) v oblastiach núdzových zálivov, preto sme v týchto miestach v rámci experimentu umiestnili dva samostatné anemometre so smerovníkmi a tri optické brány zaznamenávajúce výskyt dymu v úrovni dýchacieho ústrojenstva človeka.



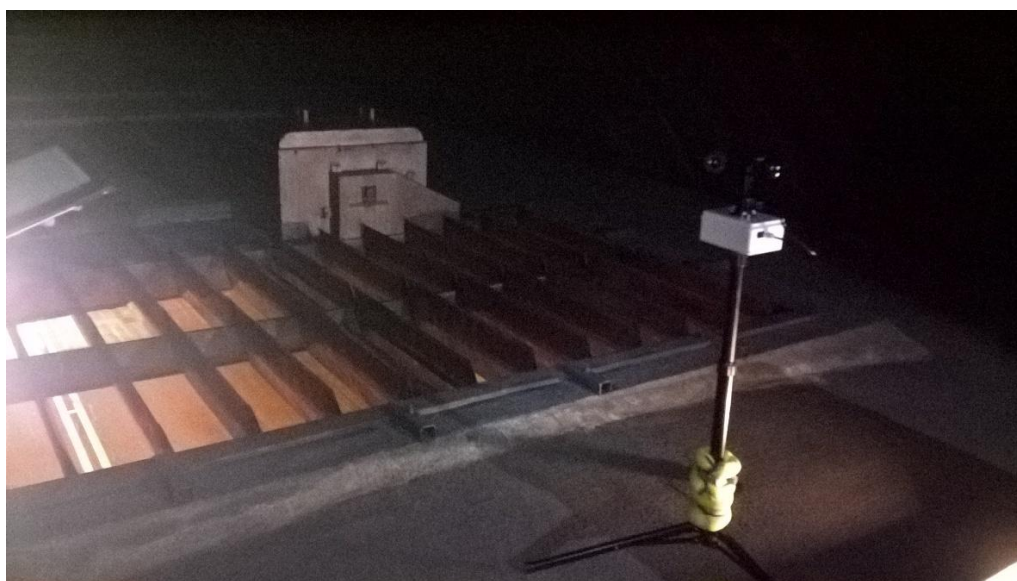
Obrázok 5: Experiment in situ (tunel Poľana) so studeným dymom – aerosólom

Ďalšie spomínané samostatné merania na portáloch tunelov Poľana, Považský Chlmec a Ovčiarsko boli zamerané na sledovanie vplyvu vonkajších klimatických podmienok na prúdenie vzduchu v tuneli. Preto sme počas vybraných skúšok vetrania umiestnili na vopred špecifikovaných miestach anemometer so smerovníkom (Obr. 6). Ostatné klimatické údaje zaznamenávali meteostanice príslušných tunelov.



Obrázok 6: Anemometer so smerovníkom na portáli tunela Ovčiarско

Nemenej dôležitým bolo meranie prúdenia vzduchu vo vzduchotechnickom kanáli tunela Branisko (Obr. 7), kde sme sledovali stabilitu/pokles rýchlosti prúdenia vzduchu počas požiaru so studeným dymom v rámci taktického cvičenia pohotovostných záchranných zložiek a správcu tunela.

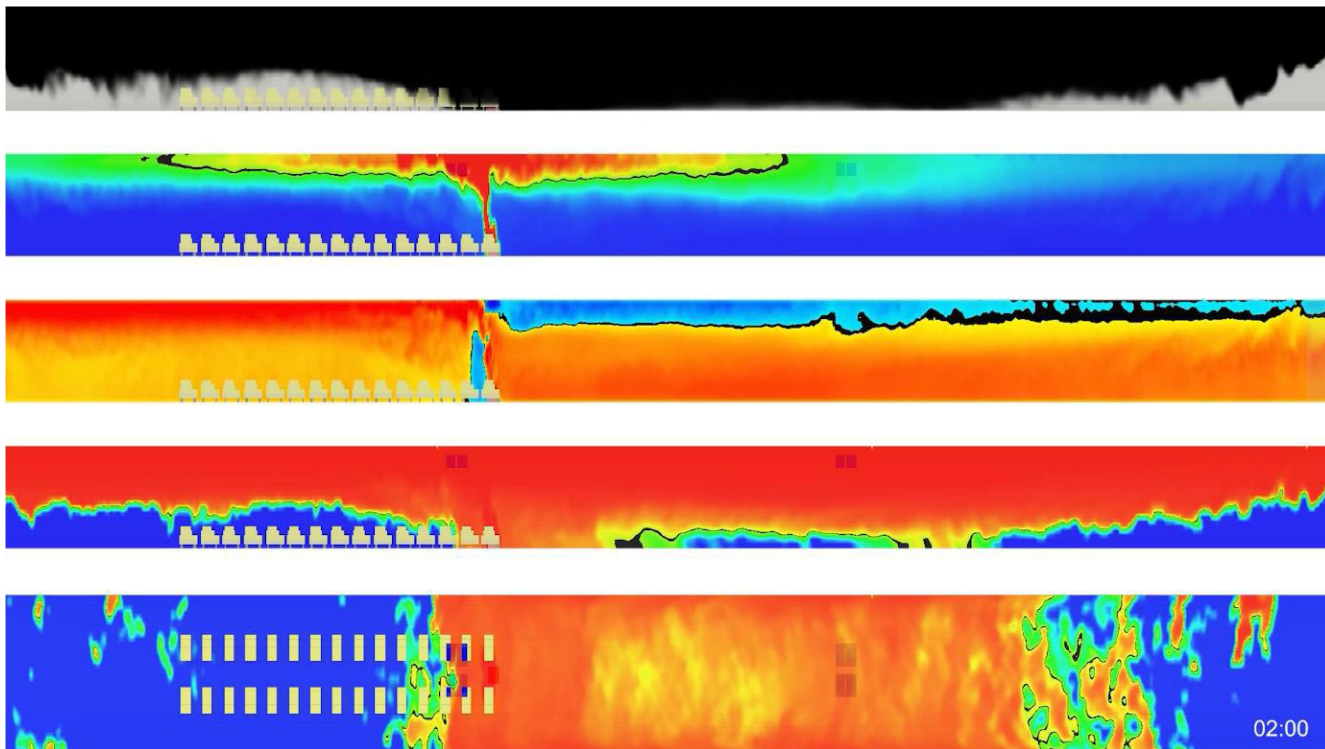


Obrázok 7: Anemometer vo vzduchotechnickom kanáli tunela Branisko

2.3 SIMULÁCIE ŠÍRENIA DYMU PRE VIRTUÁLNY TUNEL SIMULÁTORA

V rámci projektu bolo kolegami z Ústavu informatiky Slovenskej akadémie vied spracovaných šesť simulácií šírenia dymu v troch rôznych miestach tunela. Pre každé miesto boli vytvorené dve simulácie, pričom prvá bola založená na princípoch vetrania a šírenia dymu vo virtuálnom tuneli simulátora, ktorý využíva veľmi jednoduchý algoritmus prúdenia vzduchu v tuneli. Každá druhá simulácia bola založená na nových princípoch vetrania tunelov vychádzajúcich kritickej rýchlosti prúdenia vzduchu počas požiaru v tuneli s jednosmernou premávkou. Ku každej simulácii bolo vytvorených päť vizualizácií (Obr. 8):

1. 3D vizualizácia šírenia dymu,
2. 2D vizualizácia teplotných polí,
3. 2D vizualizácia rýchlostných polí,
4. 2D vizualizácia viditeľnosti,
5. 2D vizualizácia v úrovni ľudskej hlavy.



Obrázok 8: Vizualizácie simulácie šírenia dymu pri požiari s kritickou rýchlosťou vetrania pod prvou dvojicou ventilátorov virtuálneho tunela v 120. sekunde požiariu

3. PRVÉ INFORMÁCIE O NOVOM PROJEKTE

Projekt APVV-24-0429 Experimentálne skúmanie a počítačové modelovanie prúdenia vzduchu pri požiari v cestnom tuneli je aktuálne len na začiatku. Uskutočnili sa prvé rokovania medzi riešiteľmi projektu a budúcimi odberateľmi výsledkov/výstupov projektu. Stretnutia mali charakter plánovania, špecifikácie požiadaviek, prípravy a testovania meracích prístrojov, obstarania nových potrebných meracích prístrojov. Testovanie meracích prístrojov (anemometrov a smerovníkov) sa uskutočnilo vo veternom tuneli (Obr. 9) na Katedre stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline. Namerané hodnoty boli porovnávané s prenosným digitálnym anemometrom MASTECH MS6250. Výsledky testov dopadli výborne. Namerané hodnoty boli porovnateľné s presným prenosným digitálnym anemometrom.



Obrázok 9: Test anemometrov a smerovníka vo veternom tuneli

Meracie prístroje sme následne využili na experiment in situ, ktorý sa uskutočnil 1. decembra 2025 počas dymových skúšok tunela Višňové. Merali sme rýchlosť a smer prúdenia vzduchu na portáloch tunela ako potenciálneho vplyvu na rýchlosť prúdenia vzduchu v tuneli, a teda šírenia dymu. Namerané hodnoty boli odoslané na ďalšie spracovanie. Žiaľ, aktuálne ešte nemáme k dispozícii ostatné vstupné údaje z tunela a taktiež momentálne nemôžeme z dôvodu GDPR prezentovať akékoľvek údaje, výsledky a fotografie týkajúce sa tunela Višňové.

Ciele projektu sú však jasné a veríme, že sa nám ich spoločným úsilím podarí naplniť:

- realizácia experimentov in situ v dvoch diaľničných tuneloch s cieľom sledovať a monitorovať vplyv núdzového vetrania a meteorologických faktorov na rýchlosť prúdenia vzduchu a šírenie dymu v tuneli,
- vytvorenie počítačových simulácií testovaných scenárov (príprava vstupných dát, návrh paralelizácie, realizácia simulácie na HPC systéme, vyhodnotenie a vizualizácia výsledkov simulácie a ich validácia pomocou experimentálnych dát,
- úprava/rozšírenie simulátora v zmysle požiadaviek aktuálnej legislatívy,
- evidencia a vyhodnotenie mimoriadnych udalostí zo slovenských tunelov,
- vytvorenie vizualizácií scenárov požiaru a ich integrácia do simulátora.

4. ZÁVER

Vzhľadom na dlhoročné skúsenosti s experimentálnymi meraniami, počítačovou simuláciou a úspešné výsledky vzájomnej spolupráce partnerov projektu v predchádzajúcom období, je veľký predpoklad, že dosiahnutie stanovených cieľov je reálne. Očakáva sa, že výsledky projektu budú mať priaznivý vplyv nielen na riešenie závažných problémov súvisiacich s požiarimi tunelov, ale aj na prevenciu pred požiarimi a na zvýšenie pripravenosti operátorov tunelov, mechanikov údržby tunelov, hasičov a záchranárov podieľajúcich sa na záchrane životov, hodnôt a majetku počas núdzovej situácie, ako aj pre zlepšenie legislatívy.

5. POĎAKOVANIE

„Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-24-0429.“

Ing. Peter Danišovič, PhD.

Katedra technológie a manažmentu stavieb, Stavebná fakulta, Žilinská univerzita v Žiline

peter.danisovic@uniza.sk