

POŽÁRNÍ BEZPEČNOST SILNIČNÍCH TUNELŮ SE ZAMĚŘENÍM NA MODELOVÁNÍ POŽÁRU

Pavel Moucha, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
pavel.moucha@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek shrnuje hlavní poznatky z diplomové práce zabývající se problematikou požární bezpečnosti silničních tunelů se zaměřením na modelování požáru. Práce je součástí projektu Výzkum a vývoj inovativních metod a materiálů pro navrhování tunelových staveb z hlediska požární bezpečnosti. Část textu je věnována provedené rešerší v oblasti požární bezpečnosti silničních tunelových staveb, stěžejní část tvoří parametrická studie matematického modelování požáru v silničních tunelech prostřednictvím CFD modelu (zacílení na faktory ovlivňující chování požáru, intenzitu hoření v porovnání s požárem na volném prostranství, dále teplotní charakteristiky a šíření kouře v prostoru tunelu). Parametrická studie současně porovnává zadefinování požáru v CFD modelu pomocí hoření samotného materiálu (konkrétně na bázi polyuretanu) a vstupní křivky HRR (extrahované z velkorozměrové zkoušky).

KLÍČOVÁ SLOVA

Požár • Tunel • Modelování • CFD • Šíření kouře

ABSTRACT

This paper summarizes the main findings from the thesis dealing with the fire safety of road tunnels with a focus on fire modelling. The thesis is part of the project Research and development of innovative methods and materials for the fire safety design of tunnel structures. A part of the text is devoted to the research carried out, the main part consists of a parametric study of fire modelling in road tunnels (focusing on factors influencing fire behaviour, burning intensity compared to fire in the open air, as well as temperature characteristics and smoke spread in the tunnel space). The parametric study simultaneously compares the fire data input in the CFD model using the burning of the material itself (specifically polyurethane-based) and the input HRR curve (extracted from a large-scale fire test).

KEYWORDS

Fire • Tunnel • Modelling • CFD • Smoke Spread

1. ÚVOD

Vzhledem k výrazné urbanizaci, rychlému nárůstu počtu vozidel na silnicích a rostoucí potřebě rychlé a efektivní přepravy lidí a zboží se silniční tunely staly zcela nepostradatelným pilířem moderní dopravní infrastruktury. Silniční tunelové stavby jsou jedním z klíčových řešení, které umožňují efektivně překonávat nepríznivé přírodní bariéry v krajině, odvádět dopravu z center měst, celkově zvyšovat kapacitu a plynulost dopravy a minimalizovat negativní environmentální dopady. S výstavbou a údržbou tunelů přímo souvisejí i vysoké finanční náklady.

Požární bezpečnosti silničních tunelů je v posledních desiletích věnována značná pozornost zejména s ohledem na historické události, které poukázaly na závažnost rizik spojených s požáry v těchto podzemních líniových stavbách. V minulosti již došlo k několika závažným incidentům, které vedly ke ztrátám na životech a značným materiálním škodám. Ze statistického pozorování sice vyplývá řádově nižší četnost mimorádných událostí s následným požárem (výbuchem či únikem nebezpečných látek) v silničních tunelech oproti otevřeným pozemním komunikacím, specifická rizikovost silničních tunelů ovšem v konečném důsledku eskaluje do značně závažných negativních dopadů, které se přímo promítají do evakuace (a případných úmrtí) osob, enormního zatížení konstrukcí ostění tunelů během požáru, a dále i do často ztížených (v krajině případech dokonce znemožněných) požárních zásahů. [1]

Na silniční tunely jsou kladený přísné bezpečnostní požadavky včetně nutnosti požárních zkoušek před uvedením těchto staveb do běžného užívání – provádí se zejména kontrola elektrické požární signalizace, systému větrání a dalších návazných technických zařízení. Zmíněné požární zkoušky jsou finančně nákladné a současně nemohou zcela správně vystihnout skutečný průběh nastalé požární situace, neboť musí být mnohdy prováděny prostřednictvím dýmovnic za tvorby kouře se značně odlišnými (především teplotními) charakteristikami z důvodu zamezení poškození silničního tunelu včetně jeho vybavení. Vhodným přístupem v kontextu řešení této problematiky je využití matematického modelování požáru.

Oblasti aplikace numerických CFD modelů požáru se v rámci požárně inženýrského přístupu neustále rozšiřují – v případě silničních tunelových staveb se nejedná pouze

* Školitel: doc. Ing. Josef Novák, Ph.D.; Školitel specialista: Ing. Martin Benýšek, Ph.D.

o přesnější výstupy teplotních průběhů nebo posouzení optimálního vybavení prostorů požárně bezpečnostními zařízeními. CFD modely nacházejí své uplatnění i při posuzování konstrukcí ostění tunelů při teplotním namáhání požárem nebo obdobně slouží pro optimalizaci a zdokonalení postupů při mimořádných událostech v silničních tunelech, a to včetně návaznosti na evakuaci osob. [1]

Prostřednictvím matematického modelování požáru lze v porovnání s konzervativními metodami obecně dosahovat podrobnějších a přesnějších výstupů průběhu požární situace s následnou možností využití získaných dat pro návrh požární bezpečnosti a zpracování rizikových analýz silničních tunelo-vých staveb.

Tento článek shrnuje hlavní poznatky z diplomové práce zabývající se právě požární bezpečností silničních tunelů se zaměřením na modelování požáru. Následující části textu jsou věnovány provedené rešerši v oblasti požární bezpečnosti silničních tunelových staveb, stěžejní část tvoří parametrická studie matematického modelování požáru v silničních tunelech prostřednictvím CFD modelu (zacílení na faktory ovlivňující chování požáru, intenzitu hoření v porovnání s požárem na volném prostranství, dále teplotní charakteristiky a šíření kouře v prostoru tunelu). Parametrická studie současně porovnává zadefinování požáru v CFD modelu pomocí hoření samotného materiálu (konkrétně polyuretanu) a vstupní křivky HRR.

2. POŽÁRNÍ BEZPEČNOST V SILNIČNÍCH TUNELECH

Z pohledu legislativy a normativních předpisů je pro silniční tunely stěžejní ČSN 73 7507 – Projektování tunelů pozemních komunikací; TP 98 – Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací; TP 154 – Provoz správa a údržba tunelů pozemních komunikací; Metodický pokyn Ministerstva dopravy ČR: Větrání silničních tunelů; dále NV č. 264/2009 Sb.; Vyhláška MV č. 246/2001 Sb. a Vyhláška č. 460/2021 Sb.

Z důvodu vysokých nároků kladených na zajištění bezpečnosti provozu se silniční tunely rozdělují na tunely s jedno-směrným a obousměrným provozem v tunelové troubě. Dále se tunely rozdělují podle délky obvykle na krátké (do 300 m včetně), střední (300 – 1 000 m) a dlouhé (nad 1 000 m).

Z pohledu požární bezpečnosti se požární úseky silničních tunelů zařazují do V. stupně požární bezpečnosti (pro krátké tunely), resp. do VII. stupně požární bezpečnosti (pro střední a dlouhé tunely) ve smyslu ČSN 73 7507. Současně tunely, které procházejí pod zástavbou nebo vodním tokem a mají délku větší než 500 m, spadají na základě Nařízení vlády č. 264/2009 Sb. do VII. stupně požární bezpečnosti.

Požární odolnost stavebních konstrukcí silničních tunelů je poté stanovena podle ČSN 73 0804, tab. 10. Pro V. stupeň požární bezpečnosti je požadována požární odolnost nosné konstrukce tunelu R 120/DP1. Pro VII. stupeň požární bezpečnosti je požadována požární odolnost nosné konstrukce tunelu R 180/DP1. Požární uzávěry na únikových cestách musí splňovat požární odolnost EW(I) 90/DP1 – C,S. Pro ověřování požární odolnosti tunelových konstrukcí se v ČR používá normová teplotní křivka ISO 834 s teplotou 1 109,7 °C ve 180. minutě požáru, viz Obr. 1.

Podle Vyhlášky č. 460/2021 Sb. je silniční tunel s délkou do 100 m stavbou kategorie I (tzn. pro stavbu musí být vypracován projekt požárně bezpečnostního řešení, ale stavba nepodléhá státnímu požárnímu dozoru). Silniční tunel s délkou 100 - 1 000 m je stavbou kategorie II (tzn. pro stavbu musí být vypracován projekt požárně bezpečnostního řešení a stavba podléhá státnímu požárnímu dozoru ze strany územního odbooru HZS ČR). Silniční tunel s délkou nad 1 000 m je stavbou kategorie III (tzn. pro stavbu musí být vypracován projekt požárně bezpečnostního řešení a stavba podléhá státnímu požárnímu dozoru ze strany Ministerstva vnitra – generálního ředitelství HZS ČR). Dále na základě Vyhlášky MV č. 246/2001 Sb. je silniční tunel s délkou nad 350 m považován za objekt se složitými podmínkami pro zásah jednotek požární ochrany (požaduje se vypracování dokumentace zdolávání požáru a zajištění návazných opatření).

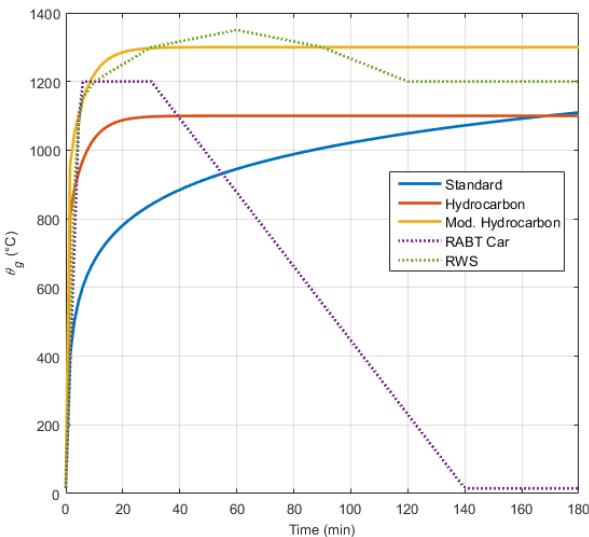
Dle legislativních požadavků se pro dimenzování systému požárního větrání předpokládá požár o výkonu 5 MW, 30 MW nebo 50 MW v závislosti na délce silničního tunelu a podílu nákladní automobilové dopravy v rámci dopravní intenzity. Odlišný požární výkon je v případě potřeby možné určit na základě rizikové analýzy.

3. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ POŽÁRU V SILNIČNÍCH TUNELECH

Nejzásadnějším parametrem popisující průběh požáru je rychlosť uvolňování tepla (zkráceně HRR – *Heat Release Rate*), kterou ovlivňuje značné množství faktorů – zejména charakter zdroje hoření (v těchto případech závislý na druhu vozidla a specifikaci případného přepravovaného nákladu), materiálové provedení a tepelná zpětná vazba konstrukcí ostění tunelu, dále navržený systém větrání (zejména rychlosť proudění vzduchu), prostorová geometrie (efektivní výška, podélné sklonky) silničního tunelu ad.

Průběhy teplot během nastalé požární situace v silničním tunelu jsou stěžejním faktorem v otázkách působení tepelného toku na unikající osoby a konstrukce podzemní liniové stavby, odhadu doby detekce vzniklého požáru a stanovení možností jeho následného šíření.

V rámci mezinárodních studií a projektů velkorozměrových požárních zkoušek byly identifikovány charakteristické požáry v podzemních liniových stavbách a odvozeny nominální teplotní křivky (Obr. 1) reflekující jednotlivé požární situace – zejména s ohledem na značné množství pohonného hmot a specifikum větrání silničních tunelových staveb jsou zmíněny teplotní křivky výrazně přísnější oproti standardním, užívaných pro běžné uzavřené prostory budov (normová teplotní křivka ISO 834). [1, 2, 3]



Obrázek 1: Teplotní křivky pro silniční tunely [4]

Neexistuje jednotný postup výběru teplotní křivky ve vztahu k rychlosti uvolňování tepla, rychlosti proudění vzduchu (resp. způsobu větrání), prostorové geometrii tunelu apod. – teplotní křivky mohou ve většině případů dosahovat značného odchýlení od skutečného průběhu požáru. S ohledem na tuto skutečnost je v případech komplexního posouzení doporučena aplikace zpřesněných modelů požáru.

Ty jsou v první řadě reprezentovány zónovými modely požáru a dále modely založenými na principu dynamického proudění kapalin a plynů, též označované jako CFD modely (z anglického *Computational Fluid Dynamics*). V praxi nacházejí CFD modely své uplatnění především v otázkách požárně inženýrského přístupu – omezujícími faktory jsou ovšem délka výpočetního času a nároky na hardware. Využitelnost zónových modelů požáru v kontextu silničních tunelových staveb je zpravidla nevhodná nebo zásadně limitována – pro podzemní silniční liniové stavby byla doposud úspěšně validována pouze úzká skupina zónových modelů (příkladem je program CFAST), jejich správné použití cílí na výstupy základních charakteristik, obzvláště maximální teploty dosahované uvnitř tunelu během nastalé požární situace. [5, 6, 7]

Sohlehlivá predikce šíření požáru a kouře v silničních tunelech na základě fyzikálních principů prostřednictvím CFD modelů je slibným přístupem pro posílení bezpečnosti osob a zefektivnění návrhu požární bezpečnosti v podzemních silničních liniových stavbách. Výstupy z numerických modelů požárních situací mohou dobře posloužit k vytváření konceptu a současně hodnocení závěrů analýzy rizik.

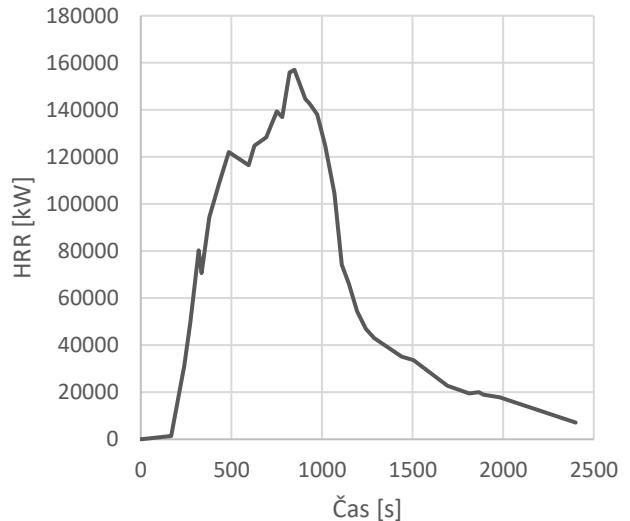
4. PARAMETRICKÁ STUDIE POŽÁRU

Parametrická studie požáru řešená v rámci diplomové práce má hned několik částí. Níže je přiblížena část zabývající se teplotními charakteristikami a zpětným prouděním kouře (tzv. back-layeringem) v silničním tunelu.

Pro CFD model požáru byl použit bezplatný open-source program FDS ve verzi 6.9.1 (rozhraní Pyrosim).

Závažné požáry v rámci historie opakovaně prokázaly, že zásadním rizikem v prostoru silničních tunelů jsou nákladní vozidla dálkové dopravy nad 12,0 tun převážející hořlavé

hmoty (např. na bázi plastů). Vstupní křivka HRR (Obr. 2) byla převzata z velkorozměrové požární zkoušky, přičemž reprezentuje výše uvedenou skutečnost. [1]



Obrázek 2: Vstupní křivka HRR požáru vozidla nad 12,0 t [1]

Pro účely modelování požáru byl zvolen dvoupruhový silniční tunel standardizovaný pro dálniční síť v České republice. Městské silniční tunely nejsou obecně určeny pro nákladní automobilovou dopravu, proto nejsou při modelování požáru ani uvažovány. 3D model silničního tunelu reflekтуje geometrické uspořádání dle návrhových norem včetně standardizovaného příčného řezu – konkrétně s vnějšími rozměry v příčném řezu 12,0 x 8,0 m (š x v) a s vnitřními rozměry v příčném řezu 11,0 x 7,0 m (š x v). S ohledem na výpočetní náročnost modelu byla zvolena celková délka tunelu 200 m.

Ostění silničního tunelu je kompletně vymodelováno z prostého betonu s objemovou hmotností $2\ 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, měrnou tepelnou kapacitou $1,04 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a tepelnou vodivostí $1,80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Proces hoření v CFD modelu silničního tunelu je definován chemickou reakcí polyuretanu se sumárním vzorcem $\text{C}_{6,3}\text{H}_{7,1}\text{O}_{2,1}\text{N}_{1,0}$, kritickou teplotou plamene $1\ 427^\circ\text{C}$, produkci CO 0,024 kg/kg a produkci častic kouře 0,113 kg/kg – v souladu s provedenou velkorozměrovou zkouškou, kdy byly spalovány především kompaktní bloky polyuretanu.

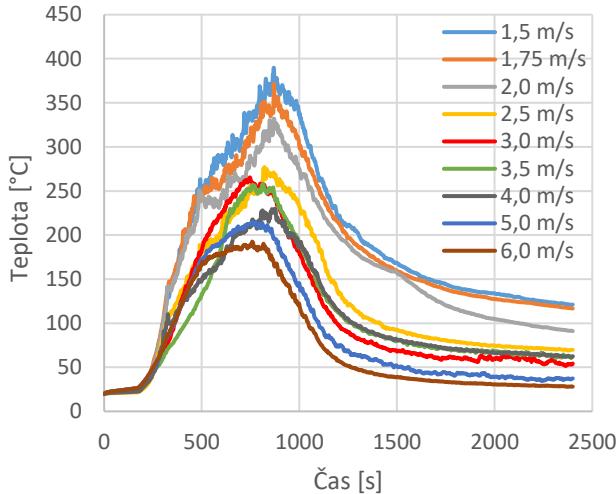
Celý výkon požáru byl umístěn na půdorysnou plochu hořáku (reprezentující nákladní vozidlo nad 12 tun) o rozměrech 14,0 x 3,0 m ($42,0 \text{ m}^2$) – množství uvolněné energie na jednotku plochy HRRPUA odpovídá hodnotě $3\ 728,571 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ v čase 847 s (maximální hodnota).

3D model silničního tunelu je zasazen do sady trojrozměrných výpočetních sítí – v bezprostřední blízkosti zdroje hoření jsou zadefinovány celkem 3 výpočetní sítě (s délkou 3 x 10 m v podélném směru), každá o délce hrany buňky 0,5 m. Zbývající části tunelu pokrývají celkem 2 výpočetní sítě (s délkou 2 x 85 m), každá o délce hrany buňky 1,0 m.

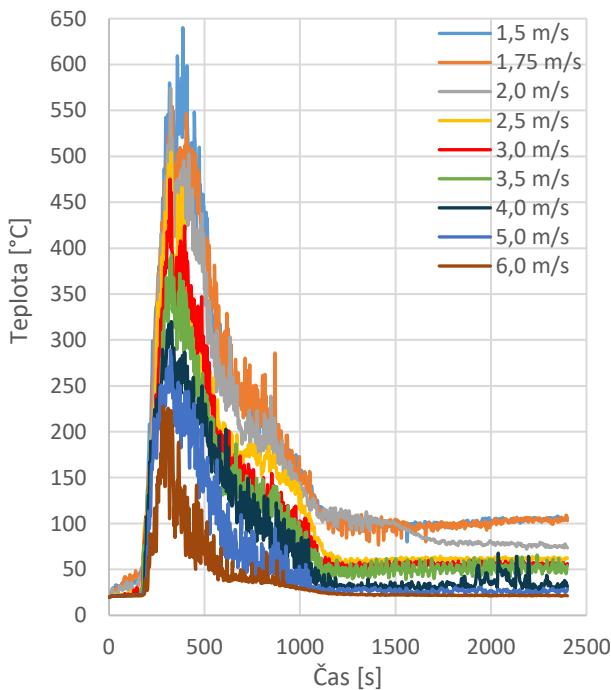
V rámci analýzy chování požáru, teplotních charakteristik a šíření kouře byla pro jednotlivé požární scénáře stanovena různá rychlosť proudění vzduchu v tunelu – portály tunelu byly ve všech případech otevřeny a byly parametricky zafixovány

– buď zcela bez vynuceného proudění vzduchu nebo s rychlosťí proudění vzduchu až $6,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v souladu se skutečnými podmínkami rychlosti proudění vzduchu v silničním tunelu při nastalé požární situaci. [1, 2, 3]

Výstupní teploty plynů a povrchové teploty konstrukce ostění jsou graficky znázorněny níže na Obr. 3 a Obr. 4.



Obrázek 3: Povrchové teploty konstrukce ostění nad požárem



Obrázek 4: Teploty plynů nad požárem

Hlavním rizikem při požáru v silničním tunelu je také možné rychlé zakouření prostoru, které má přímý vliv na evakuaci osob i následný zásah hasičů. Správná volba ventilačního systému je klíčová pro zajištění požární bezpečnosti v silničních tunelových stavbách – vliv na průběh teplot je znázorněn již na Obr. 3 a Obr. 4 výše.

Během reálných velkorozměrových zkoušek v Runehameru, kdy se teploty dostaly až k $1\ 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, docházelo k pulzování požáru a zpětnému šíření kouře tunelem – tento jev se

v angličtině nazývá back-layering a stejně jako kritická rychlosť proudění vzduchu v tunelu je nejčastěji zkoumanou problematikou v oblasti požární bezpečnosti silničních tunelů. [1]

Back-layering nastává, když v hořícím tunelu není dostačující příspun kyslíku, což následně vede k nedokonalému spalování a tvorbě velkého množství zplodin hoření. V blízkosti ohniska požáru vzniká turbulentní proudění vzduchu, přičemž teplo produkované spalováním ohřívá okolní vzduch, což způsobuje vznik vztlakových sil, které ovlivňují směr a proudění vzduchu uvnitř tunelu. Pokud není zajištěna dostačující rychlosť podélného proudění vzduchu, dochází u stropu tunelu k vytvoření zpětného proudu horkých plynů. Kouř a zplodiny hoření se pak mohou šířit opačným směrem, čímž mohou zásadně ovlivnit nebo dokonce znemožnit bezpečnou evakuaci osob. Zpětnému šíření kouře lze zamezit zajištěním vyšší rychlosti podélného proudění vzduchu, než je kritická rychlosť proudění – pro většinu silničních tunelových staveb stanovena hodnota přibližně $3 \text{ až } 3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato hodnota byla ověřena předmětným CFD modelem požáru v silničním tunelu – viz shrnutí dále včetně Obr. 5, Obr. 6 a Obr. 7. [1, 3]

Při rychlosti podélného proudění vzduchu $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v silničním tunelu se v čase 185 sekund poprvé projevuje back-layering, prostřednictvím kterého se kouř a zplodiny hoření v čase 285 sekund dostávají až k portálu tunelu. U portálu silničního tunelu následně dochází skrze podélné proudění vzduchu k přisávání kouře z úrovně stropu do spodní výškové úrovně tunelu – kouř a zplodiny hoření postupují zpět k ohnisku požáru a v čase 315 sekund je již celý tunel zcela zaplněn. V čase 1 340 sekund jsou viditelné náznaky ustupujícího kouře u portálu tunelu ve spodní výškové úrovni, následně se v čase 1 590 sekund přidává i výšková úroveň u stropu. Zpětné proudění kouře kompletně mizí až v čase 2 400 sekund.

Při rychlosti podélného proudění vzduchu $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v silničním tunelu se v čase 195 sekund poprvé projevuje back-layering, prostřednictvím kterého se kouř a zplodiny hoření v čase 330 sekund dostávají až k portálu tunelu. U portálu silničního tunelu následně dochází skrze podélné proudění vzduchu k přisávání kouře z úrovně stropu do spodní výškové úrovně tunelu – kouř a zplodiny hoření postupují zpět k ohnisku požáru a v čase 365 sekund je již celý tunel zcela zaplněn. V čase 970 sekund jsou viditelné náznaky ustupujícího kouře u portálu tunelu ve spodní výškové úrovni, následně se v čase 1 140 sekund přidává i výšková úroveň u stropu. Zpětné proudění kouře kompletně mizí až v čase 1 475 sekund.

Při rychlosti podélného proudění vzduchu $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v silničním tunelu se v čase 235 sekund poprvé projevuje back-layering, prostřednictvím kterého se kouř a zplodiny hoření v čase 525 sekund dostávají ve výškové úrovni u stropu až do vzdálenosti 52 metrů od středu požáru (tj. 48 metrů od portálu tunelu). V čase 570 sekund jsou viditelné náznaky ustupujícího kouře ve výškové úrovni u stropu. Zpětné proudění kouře kompletně mizí až v čase 820 sekund.

Při rychlosti podélného proudění vzduchu $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v silničním tunelu se v čase 255 sekund poprvé projevuje back-layering, prostřednictvím kterého se kouř a zplodiny hoření v čase 340 sekund dostávají ve výškové úrovni u stropu až do vzdálenosti 26 metrů od středu požáru (tj. 74 metrů od portálu tunelu). V čase 540 sekund jsou viditelné náznaky ustupujícího kouře ve výškové úrovni u stropu. Zpětné proudění kouře

kompletně mizí v čase 600 sekund. Vzhledem ke skutečnosti, že v tomto případě bylo zpětné šíření kouře již značně minimalizováno, lze potvrdit již dříve zmíněnou informaci – tj. že zpětnému šíření kouře lze zamezit zajištěním rychlosti podélného proudění vzduchu v silničním tunelu alespoň $\sim 3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při rychlosti podélného proudění vzduchu nad $\sim 3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (od jednoho portálu k druhému) v silničním tunelu vůbec nedochází ke zpětnému šíření kouře.



Obrázek 5: Šíření kouře (při $1,5$ až $6,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) v čase 180 s



Obrázek 6: Šíření kouře (při $1,5$ až $6,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) v čase 480 s



Obrázek 7: Šíření kouře (při $1,5$ až $6,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) v čase 660 s

5. ZÁVĚR

Tento článek shrnuje hlavní poznatky z diplomové práce zabývající se problematikou požární bezpečnosti silničních tunelů se zaměřením na modelování požáru. Prostřednictvím parametrické studie CFD modelu požáru byly zhodnoceny faktory ovlivňující chování požáru, intenzitu hoření v porovnání s požárem na volném prostranství (včetně zadefinování požáru hořením samotného materiálu a vstupní křivkou HRR), dále teplotní charakteristiky a šíření kouře v prostoru silničního tunelu.

Tento článek podrobně přibližuje část zmíněné parametrické studie zaměřující se na teplotní charakteristiky a šíření kouře v prostoru silničního tunelu s ohledem na intenzitu podélného větrání v případě požáru. Z uvedených dat vyplývá, že při rychlosti podélného proudění vzduchu nad $\sim 3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze

zamezit zpětnému šíření kouře tunelem. Současně se zvyšující se hodnotou podélného větrání dochází k výrazné redukci teploty plynů i povrchové teploty konstrukce ostění tunelu.

V požárně inženýrské praxi představují CFD modely vysoký standard z hlediska modelování požáru – jsou nejdokonalejší dostupnou metodou numerického modelování. Uplatnění hojně nacházejí i při simulaci požáru v tunelových stavbách, tj. v prostorech s jedním převládajícím rozměrem – omezujicími faktory jsou především délka výpočetního času a nároky na hardware. Optimalizace délky výpočetního času je předmětem další navazující části zmíněné parametrické studie.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek, resp. diplomová práce vznikla za podpory projektu TAČR CK04000274 *Výzkum a vývoj inovativních metod a materiálů pro navrhování tunelových staveb z hlediska požární bezpečnosti* a také za podpory projektu Studentské grantové soutěže ČVUT SGS25/037/OHK1/1T/11 *Integrální bezpečnost staveb kritické infrastruktury se zaměřením na odolnost spřažených ocelobetonových konstrukcí*.

Literatura

- [1] Ingason, H., Li, Y. Z., Lönnermark, A. (2015), *Tunnel Fire Dynamics*, New York Springer, ISBN 978-1-4939-2199-7
- [2] Ingason, H., Li, Y. Z. (2018), *Overview of Research on Fire Safety in Underground Road and Railway Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology*, ISSN 08867798
- [3] Beard, A., Carvel, R. (2012), *Handbook of Tunnel Fire Safety*, B.m. ICE publishing, ISBN 0-7277-4153-5
- [4] Benýšek, M., Štefan, R. (2015-2018), *FMC. Fire Models Calculator*, v. 2.0 (15-6-2018), <https://people.fsv.cvut.cz/~stefarad/software/fmc/fmc.cz.html>
- [5] Borghetti, F., Derudi, M., Gandini, P., Frassoldati, A. (2017), *Tunnel Fire Testing and Modeling*, New York Springer, ISBN 978-3-319-49516-3
- [6] Kučera, P., Kaiser, R. (2007), *Úvod do požárního inženýrství*, 1. vyd., Ostrava: SPBI, ISBN 978-80-7385-024-1
- [7] Svobodová, N., Benýšek, M., Štefan, R. (2021), *Analysis of Zone Fire Models and Their Applications in Structural Fire Design*, in 27th Concrete Days, Curich: Trans Tech Publications, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.322.127>
- [8] Moucha, P. (2025), *Požární bezpečnost silničních tunelů se zaměřením na modelování požáru*, Diplomová práce, ČVUT v Praze, <http://hdl.handle.net/10467/121034>