

VYUŽITÍ MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ POŽÁRU PŘI POSUZOVÁNÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI V TUNELECH

Nicole Svobodová, *

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

ABSTRAKT

Tento příspěvek se zabývá využitím matematického modelování požáru při posuzování požární odolnosti tunelového ostění. Jsou zde stručně nastíněny základní požadavky na požární bezpečnost silničních tunelů a metody matematického modelování požáru v tunelech. Pro ilustrativní příklad raženého železobetonového silničního tunelu je provedena teplotní analýza pomocí zónového modelu vytvořeného v programu CFAST a CFD modelu (Computational Fluid Dynamics) vyvinutého v programu FDS. Následně je provedena teplotní analýza tunelového ostění se zaměřením na kritickou teplotu ve výzvu pro různé varianty osových vzdáleností výztuže od lince konstrukce. Tyto výsledky jsou nakonec zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tunel • Požár • Požární odolnost • CFAST • FDS

ABSTRACT

This paper deals with the utilization of mathematical fire modelling in assessing the fire resistance of tunnel linings. It briefly outlines the basic requirements for fire safety in road tunnels and methods of mathematical fire modelling in tunnels. For illustrative purposes, a thermal analysis of a bored reinforced concrete road tunnel is conducted using fire zone model created in the CFAST software tool and the CFD model (Computational Fluid Dynamics) created in the FDS software tool. Subsequently, a thermal analysis of the tunnel lining is performed, focusing on the critical temperature in the reinforcement for various axial distances of the reinforcement from the surface of the structure. These results are then evaluated.

KEYWORDS

Tunnel • Fire • Fire Resistance • CFAST • FDS

1. ÚVOD

Četnost požáru v tunelech je sice statisticky menší než v uzavřených budovách, nesou s sebou však specifická rizika (*In-gason a kol. 2015*). I v dnešní době je proto snaha zvyšovat požární bezpečnost v tunelech a reagovat např. na vývoj nových technologií a materiálů tunelového ostění.

Pro stanovení požární odolnosti konstrukce tunelového ostění je nutné znát rozložení teplot v průřezu. To lze stanovit výpočtem vedení tepla, pro který je nutné určit okrajové podmínky. Jedna z podmínek vychází z teplotní analýzy požárního úseku. Současně nejvíce používané přístupy v posuzování požární odolnosti tunelového ostění jsou většinou založeny na jednoduchých modelech požáru reprezentovaných např. nominálními teplotními křivkami (ČSN EN 1991-1-2). V závislosti na zvoleném požárním scénáři však mohou být v některých případech tyto modely velmi konzervativní. Oproti tomu zpřesnější modely požáru (nejčastěji CFD modely) mohou přesněji přiblížit skutečný průběh požáru v hořícím prostoru, což může přispět ke zlepšení požární bezpečnosti tunelu a ekonomičnosti návrhu konstrukce ostění. Nevýhodou CFD modelů je však velká časová náročnost. Zónové modely požáru jsou oproti CFD modelům velmi rychlé, ale s ohledem na jejich limity neexistuje dostatečné množství odborných studií o vhodnosti jejich použití pro tunely. Cílem této studie bylo porovnat průběhy teplot uvnitř tunelového ostění ve vazbě na požární odolnost konstrukce a možnou ekonomičnost návrhu.

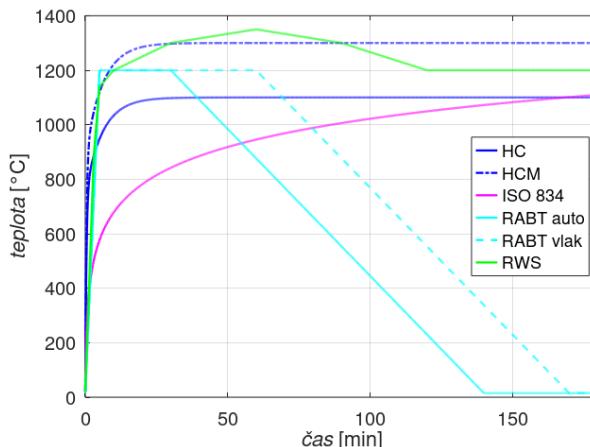
2. POŽADAVKY NA POŽÁRNÍ BEZPEČNOST SILNIČNÍCH TUNELŮ

Pro projektování silničních tunelů v České republice platí norma ČSN 73 7507 spolu s technickými podmínkami TP 98. Tunely musí splňovat požadavky na požární bezpečnost, ochranu osobní bezpečnosti a zdraví, plynulost a bezpečnost provozu a zároveň musí být ekonomicky efektivní a minimalizovat nároky na údržbu (v souladu s ČSN 73 7507, čl. 4.1.3). Projektová dokumentace tunelu řeší hodnocení rizik a požárně bezpečnostní řešení stavby (v souladu s Vyhl. č. 246/2001 Sb.). Pro tunely délky přes 500 m se zpracovává bezpečnostní dokumentace tunelu (v souladu s ČSN 73 7507, čl. 4.1.4). ČSN 73 7507 dále kategorizuje silniční tunely podle délky na krátké (více než 100 m až 500 m), střední (více než 500 m až 1000 m) a dlouhé (delší než 1000 m). Dle ČSN 73 7507, čl. 4.1.4 je z hlediska požární bezpečnosti staveb dopravní prostor tunelové trouby taxativně zatřízen do V. stupně požární bezpečnosti (krátké tunely), nebo do VII. stupně požární bezpečnosti (střední a dlouhé tunely). Požadovaná doba požární nosných a požárně dělicích konstrukcí je 120 minut (pro V. SPB), resp. 180 minut (pro VII. SPB) v souladu s 73 0802, tabulkou 12 (hodnoty je vztahují k normové teplotní křivce).

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

3. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ POŽÁRU V TUNELECH

Z hlediska matematického modelování požáru patří mezi nejednodušší modely požáru nominální teplotní křivky (např. normovou teplotní křivku ISO 834), na nichž je obvykle založeno posuzování požární odolnosti konstrukcí v požárně inženýrské praxi (ČSN EN 1991-1-2, viz také Benýšek 2021). Při požárech v tunelech může být nárůst extrémních teplot mnohem rychlejší než v budovách, proto jsou také nominální teplotní křivky určené pro tunely výrazně přísnější oproti křivkám používaným pro budovy (Obr. 1). Při posuzování požární odolnosti tunelů v ČR je dle ČSN EN 1991-1-2 navíc možné používat i normovou teplotní křivku, přestože např. při požáru nákladního vozidla mohou teploty v tunelu přesahovat hodnoty této křivky. Na druhou stranu, některé nominální teplotní křivky určené pro tunely mohou být v určitých případech velmi konzervativní.



Obr. 1: Nominální teplotní křivky určené pro tunely dle Evropského kodexu a pomocí programu FMC (Benýšek, Štefan 2015)

Vyjma těchto jednoduchých modelů požáru existují i zpřesněné (pokročilé) modely požáru, mezi něž se řadí především modely dynamického proudění kapalin a plynů, tzv. CFD modely a zónové modely požáru (ČSN EN 1991-1-2, viz také Svobodová et al. 2021). CFD modely jsou široce využívány v praxi založené na požárně inženýrském přístupu (Ingason a kol. 2015; Kučera a Pezdová 2010). Do dnešního dne existuje mnoho aplikací matematického modelování požáru při reálných situacích v silničních tunelech. Výsledky získané z numerických modelů mohou sloužit jako podklad pro hodnocení rizik bezpečnosti osob přítomných v železničních tunelech v kontextu vytváření návrhu požární bezpečnosti železničních tunelů (Van Weyenberghe a kol. 2015, Papakonstantinou a kol. 2023).

Oproti tomu zónové modely požáru všeobecně nejsou vhodné pro tunely, neboť nejsou určeny pro simulace prostoru s jedním převládajícím rozměrem (Ingason a kol. 2015; Klote a Forney 1993; Kučera a Pezdová 2010; Karlsson a Quintiere 1999). Do dnešního dne bylo vyvinuto několik zónových modelů, které byly validovány i pro liniové stavby, např. zónový model CFAST (Peacock a kol. 2019). Jejich hlavní výhodou ve srovnání s CFD modely je rychlosť výpočtu, ale s ohledem na jejich limity neexistuje dostatek studií o vhodnosti jejich použití pro tunely. Při správné aplikaci může zónový model

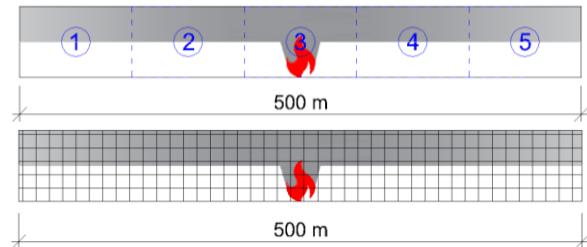
CFAST představovat potenciál např. z hlediska rychlé představy o přibližných teplotách v hořícím tunelu.

4. ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLAD

Jako vzorový příklad je zde uvažován požár v raženém železobetonovém silničním tunelu délky 500 m. Tunel má idealizovaný obdélníkový průřez šířky 10 m a světlé výšky 5 m. Tloušťka ostění tunelu je 400 mm. Zvoleným požárním scénářem je hoření nákladního vozidla s nákladem dřeva o celkových rozměrech 2,5 x 15,0 m a výšce 3,4 m. Dle statistik způsobují právě požáry těžkých nákladních vozidel nejzávažnější následné škody (Ingason et al. 2015).

4.1. Modelování požáru

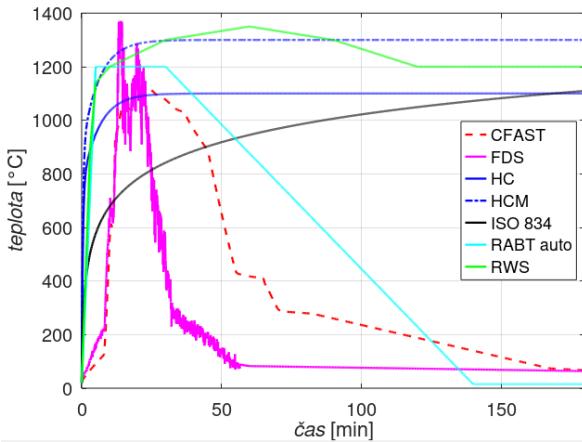
Řešený požární scénář byl simulován v zónovém modelu CFAST (Peacock a kol. 2023) a pro porovnání i v CFD modelu FDS (McGrattan a kol. 2024). Okrajovou podmínkou pro modelování požáru byla křivka rychlosti uvolňování tepla převzatá z existujícího experimentu (Ingason a kol. 2005). Definovány byly materiály konstrukcí i jejich charakteristiky. Zdroj požáru byl umístěn vždy uprostřed tunelu. Jako palivo byl uvažován materiál na bázi dřeva s chemickým vzorcem C₆H₁₀O₅ a spalným teplem 18,1 MJ/kg. V případě programu CFAST byly zohledněny limity zónových modelů požáru týkající se rozměru liniových prostorů. Řešený tunel byl proto rozdělen na pět stejných segmentů v poměru stran 10:1 (Obr. 2), které jsou mezi sebou spojeny virtuálními otvory vytvářejícími spojitý tunel (viz také Bamonte a kol. 2011, Svobodová a kol. 2022). V programu FDS byla vzhledem k dlouhé výpočetní době (v rámci několika dní) uvažována hrubší výpočetní síť s přibližně 130 tis. buňkami.



Obr. 2: Schéma tunelu: (nahoře) CFAST; (dole) FDS

Výsledkem teplotní analýzy uvnitř tunelu je průběh maximálních teplot horkých plynů uvnitř hořícího tunelu. Graf je doplněn i o všechny nominální teplotní křivky, které je možné použít pro silniční tunely (Obr. 3), tj. uhlovodíková (HC) a modifikovaná uhlovodíková (HCM) teplotní křivka, normová teplotní křivka (ISO 834), křivka RABT-ZTV pro automobil a RWS křivka. Zaměříme-li se na výsledky ze zpřesněných modelů požáru, lze vidět, že teplotní křivka z programu FDS má v první fázi růstu (cca do 13. minut) podobný průběh jako křivka z programu CFAST, ale poté následuje prudké rozvinutí požáru trvající přibližně do 22. minuty, kdy nastává chladnutí. Maximální teploty v FDS (cca 1370 °C) je dosaženo cca ve 14. minutě. Oproti tomu je v případě programu CFAST doba plně rozvinutého požáru přibližně dvakrát delší a maximální teploty (cca 1130 °C) je dosaženo cca ve 22. minutě. Průběh normové teplotní křivky (ISO 834) má pozvolnější nárůst a nemusí proto dobře reflektovat skutečný průběh požáru

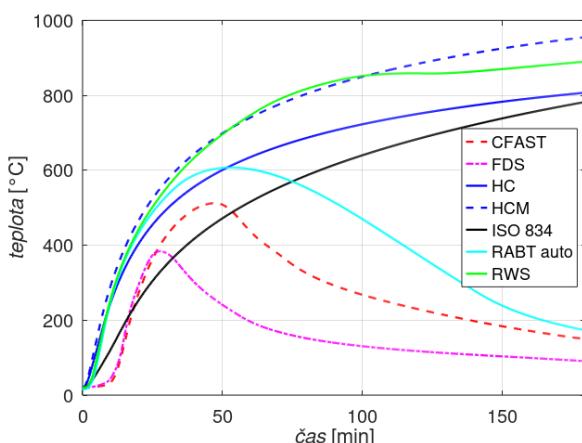
v tunelu, zejména při požáru s mimořádně velkým uvolněným teplem (např. požár těžkého nákladního vozidla s hořlavým nákladem). Ostatní nominální teplotní křivky mají rychlejší nárůst teplot, ale vyjma křivky RABT-ZTV nezahrnují fázi chladnutí.



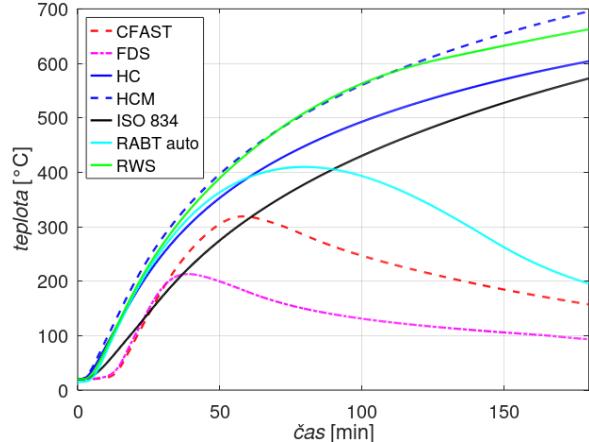
Obr. 3: Průběh teplot v posuzovaném tunelu pro vybrané modely požáru v čase 0 až 180 minut

4.2. Teplotní analýza tunelového ostění

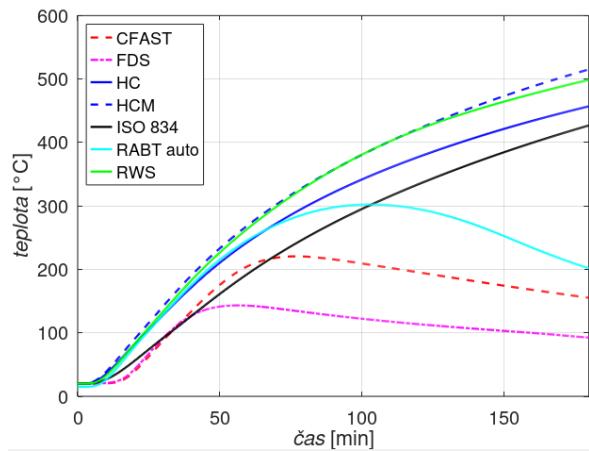
Pro ostění řešeného tunelu byly stanoveny průběhy teplot ve výztuži pomocí výpočetního programu TempAnalysis (Štefan a kol. 2009), který funguje na principu řešení rovnice přenosu tepla jedním směrem (viz Štefan 2015). Okrajovou podmínkou výpočtu byly průběhy teplot pro vybrané modely požáru. Materiálové vlastnosti betonu v závislosti na teplotě byly převzaty z ČSN EN 1992-1-1. Byla uvažována počáteční teplota 20 °C, horní mez teplelné vodivosti, počáteční vlhkost 1,5 % hmotnosti betonu, počáteční objemová hmotnost 2300 kg/m³, součinitel přestupu tepla 25-50 W·m⁻²·K⁻¹ a emisivita 0,7. Vliv výztuže na distribuci teplot prvkem byl zanedbán. Na odvrácené straně průřezu je předepsán nulový teplelný tok (Štefan a kol. 2009). Výsledkem teplotní analýzy tunelového ostění je průběh teplot ve výztuži (Obr. 4-6). Vypočtena je teplota ve vzdálenosti x = 20 mm, x = 40 mm a x = 60 mm od líce ostění. Vypočtené průběhy teplot mohou sloužit jako podklad pro mechanickou analýzu a pro posouzení požární odolnosti konstrukce, např. pomocí zjednodušených, nebo zpřesněných výpočetních metod dle ČSN EN 1992-1-2.



Obr. 4: Průběh teplot ve výztuži (ve vzdálenosti x = 20 mm od líce ostění) pro vybrané modely požáru



Obr. 5: Průběh teplot ve výztuži (ve vzdálenosti x = 40 mm od líce ostění) pro vybrané modely požáru



Obr. 6: Průběh teplot ve výztuži (ve vzdálenosti x = 60 mm od líce ostění) pro vybrané modely požáru

Pro tyto účely bylo provedeno zjednodušené posouzení požární odolnosti tunelového ostění pouze na základě kritické teploty oceli. Sledován byl čas, kdy je v konstrukci ve vzdálenosti „x“ dosažena teplota 500 °C (Tab. 1), přičemž pokud této teploty po celou sledovanou dobu nebylo dosaženo, čas je značen jako „nestanoven.“

Tab. 1: Čas dosažení teploty 500 °C ve vzdálenosti „x“ od líce ostění pro různé teplotní křivky

Teplotní křivka	Čas dosažení teploty 500 °C ve vzdálenosti „x“ od líce ostění [min]		
	x = 20 mm	x = 40 mm	x = 60 mm
CFAST	41,0	nestanoven	nestanoven
FDS	nestanoven	nestanoven	nestanoven
HC	30,6	104,0	nestanoven
HCM	22,7	77,6	168,6
ISO 834	56,2	134,2	nestanoven
RABT auto	26,4	nestanoven	nestanoven
RWS	24,8	77,0	180,0

Na základě těchto výsledků vychází nejpříznivěji zpřesněné modely požáru (program FDS a CFAST) a normová teplotní křivka (ISO 834). S rostoucí osovou vzdáleností výztuže od povrchu se i zvyšuje doba, kdy je ve výztuži dosažena kritická teplota oceli. Oproti tomu nejkonzervativnější výsledky jsou získány na základě modifikované uhlovodíkové teplotní křivky (HCM) a křivky RABT-ZTV pro automobil. Při variantě vzdálenosti x = 60 mm od líce ostění ve většině případů

(vyjma HCM křivky) nebyla dosažena kritická teplota výztuže 500 °C po celou sledovanou dobu maximální požadované požární odolnosti konstrukce, tj. 180 minut. Použití zpřesněných modelů požáru může vést k ekonomičtějšímu návrhu konstrukce.

5. ZÁVĚR

Tento příspěvek se věnoval využití matematického modelování požáru při posuzování požární odolnosti tunelového ostění. Byla provedena teplotní analýza raženého železobetonového silničního tunelu délky 500 m. Požár byl modelován pomocí zónového modelu v programu CFAST a pro porovnání pomocí CFD modelu v programu FDS. Graf znázorňující průběhy maximálních teplot v prostoru byl doplněn i o nominální teplotní křivky určené pro silniční tunely. Následně byla provedena teplotní analýza tunelového ostění. Pro různé varianty vzdálenosti od líce ostění byla zjišťován čas, kdy bude v konstrukci dosažena kritická teplota oceli 500 °C.

Z uvedených výsledků vyplývá, že v rámci této studie vychází nejpříznivěji zpřesněné modely požáru (program FDS a CFAST). Nominální teplotní křivky (zejména HCM a RABT-ZTV) jsou v porovnání se zpřesněnými modely konzervativnější. Oproti tomu normová teplotní křivka může naopak podhodnocovat výsledné teploty v závislosti na zvoleném požárním scénáři a maximálním uvolněném teplu. Použití zpřesněných modelů požáru může celkově vést k ekonomičtějšímu návrhu konstrukce. Program FDS je v požárně inženýrské praxi standardem z hlediska modelování požáru v tunelech. Jeho nevýhodou je však dlouhá výpočetní doba (obvykle v řádu dní). Oproti tomu zónový program CFAST je velmi rychlý (obvykle v řádu minut), ale vzhledem k tomu, že zónové modely všeobecně nejsou určeny pro tunelové stavby (a jiné prostory s jedním převládajícím rozměrem), neexistuje přesvědčivé množství odborných studií o vhodnosti jeho použití pro tunely. Z tohoto důvodu je potřeba provést více studií se zaměřením na modelování požáru v tunelech s využitím programu CFAST a jeho porovnání s CFD modely.

PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl za podpory Technologické agentury České republiky, projekt č. CK04000274, a Studentské grantové souťže ČVUT, projekt č. SGS24/039/OHK1/1T/11.

Literatura

- INGASON, Haukur, Ying Zhen LI a Anders LÖNNERMARK. *Tunnel Fire Dynamics* [online]. New York, NY: Springer New York, 2015 [vid. 2022-03-14]. ISBN 978-1-4939-2198-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2199-7
- ČSN EN 1991-1-2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. 2013
- ČSN 73 7507 – Projektování tunelů pozemních komunikací. 2013
- BENÝŠEK, Martin. Analysis of Fire Resistance of Concrete Structures Based on Different Fire Models [online]. 2021 [vid. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/98704>
- BENÝŠEK, Martin a Radek ŠTEFAN. *FMC - Fire Models Calculator* [software online]. Prague: CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Dep. of Concrete and Masonry Structures, 2015.
- SVOBODOVÁ, N., M. BENÝŠEK a R. ŠTEFAN. Analysis of zone fire models and their application in structural fire design. In: *27th Concrete Days. Curich: Trans Tech Publications*. 2021.
- KUČERA, Petr a Zdeňka PEZDOVÁ. *Základy matematického modelování požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- VAN WEYENBERGE, B., X. DECKERS, R. CASPEELE, B. MERCI. Development of a Risk Assessment Method for Life Safety in Case of Fire in Rail Tunnels. *Fire Technology*, 2015. 52. 10.1007/s10694-015-0469-y.
- PAPAKONSTANTINOU, D., A. KALLIANIOTIS, A. BENARDOS. ASET Estimation through fire dynamics simulation for various cases of fire incidents in rail tunnels, 2023. 10.1201/9781003348030-392.
- KLOTE, J. a G. FORNEY. *Zone Fire Modelling With Natural Building Flows and a Zero Order Shaft Model*. USA, Gaithersburg: NISTIR, 1993.
- KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- PEACOCK, R. D., P. A. RENEKE a G. P. FORNEY. *CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide*. 2023.
- MCGRATTAN, K., S. HOSTIKKA, R. MCDERMOTT, J. FLOYD a M. VANELLA. Fire Dynamics Simulator User's Guide. NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, 2024.
- BAMONTE, Patrick, Roberto FELICETTI, Pietro G. GAMBAROVA a Alireza NAFARIEH. On the Fire Scenario in Road Tunnels: A Comparison between Zone and Field Models. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2011, 82, 764–769. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.82.764
- SVOBODOVÁ, N., M. BENÝŠEK, R. ŠTEFAN a J. NOVÁK. Zone modelling of tunnel fires using different tunnel segmentation In: Recenzovaný Sborník abstraktů XXXI. ročníku mezinárodní konference. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., 2022. p. 106-108. ISBN 978-80-7385-256-6.
- ŠTEFAN, R., PROCHÁZKA, J. *TempAnalysis - Computer Program for Temperature Analysis of Cross Sections Exposed to Fire* [software online]. Prague: CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Dep. of Concrete and Masonry Structures, 2009.
- ŠTEFAN, R. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures. Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling*. PhD thesis, CTU in Prague, 2015.