

Evakuace osob z tunelů železnice a metra v kontextu ochrany měkkých cílů

Tomáš Apeltauer¹, Jiří Apeltauer², Petra Okřinová³, Zdeněk Dufek⁴

Abstrakt

Posouzení evakuace osob je důležitou součástí bezpečnostního řešení tzv. měkkých cílů, mezi kterými mají železniční tunely a systémy metra velmi důležitou pozici. Jednou z efektivních metod tohoto posouzení je aplikace numerického modelu evakuace doplněného o model požáru. Příspěvek tento přístup demonstruje na vybraném železničním tunelu a stanici metra v kontextu Konceptu ochrany měkkých cílů 2017 - 2020, který v roce 2017 schválila vláda ČR v reakci na zvyšující se bezpečnostní hrozby pro tyto cíle v celé Evropě.

Klíčová slova

evakuace osob, ochrana měkkých cílů, tunely, železnice, metro

Abstract

Assessing evacuation process of pedestrians is an important part of the soft targets protection, where railway tunnels and metro systems have a very important position. One of the most effective methods of this assessment is the application of a numerical evacuation model coupled with a CFD fire simulation. The contribution demonstrates this approach on the selected railway tunnel and the metro station in the context of the 2017-2020 Soft Targets Protection Concept. This concept has been approved in 2017 by the Czech government in response to the increasing security threats for these targets across Europe.

Key words

pedestrian evacuation, soft targets protection, tunnels, railway, subway

1 Úvod

Podobně jako řada jiných států světa, také Česká republika věnuje aktuálně zvýšenou pozornost prevenci teroristických útoků a jiných závažných násilných činů na místech s vysokou koncentrací obyvatelstva a nízkou úrovní zabezpečení. Typickým příkladem takových objektů jsou nákupní centra, místa sportovních utkání nebo významné dopravní uzly. Důvodem zvýšené pozornosti u těchto objektů je aktuální tendence teroristů útočit právě na tyto snadno dostupné cíle s potenciálně významným dopadem takového útoku.

Cílem Konceptu je vytvořit fungující národní systém ochrany měkkých cílů, díky kterému bude možné pružně, komplexně a rychle reagovat na hrozby útoků na měkké cíle vyplývající ze situace jak v zahraničí, tak v České republice. A současně dosáhnout stavu, kdy bude podstatná část těchto cílů v České republice připravena na něj zareagovat tak, že budou případné škody násobně nižší, než kdyby je zastihl nepřipravené. Součástí této změny je rovněž zvýšení odolnosti měkkého cíle vůči vnějšímu napadení, což je vedle nastavení komunikačních procesů a organizace a koordinace činnosti personálu také otázka prevence.

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav informatiky, Veveří 331/95 602 00 Brno, tomas.apeltauer@vut.cz.

² Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, Veveří 331/95 602 00 Brno, jiri.apeltauer@vut.cz.

³ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav informatiky, Veveří 331/95 602 00 Brno, okrinova.p@fce.vutbr.cz.

⁴ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, Purkyňova 651/139 612 00 Brno, dufek.z@fce.vutbr.cz.

Důležitou součástí prevence jako součástí zvyšování odolnosti měkkého cíle je analýza možných typických scénářů takového napadení, přičemž v této analýze hrají numerické modely pohybu osob prakticky nezastupitelnou úlohu. Je třeba si uvědomit, že běžné požárně bezpečnostní řešení stavby, jehož zpracování a schválení je podmínkou pro kolaudaci objektu a jeho uvedení do provozu, s napadením cíle přímo nepočítá. Typickým příkladem je dostupnost tzv. chráněných únikových cest v objektu během evakuace – zatímco projekt a navazující požárně bezpečnostní řešení objektu jejich dostupnost pro evakuované osoby předpokládá, logickým cílem útočnicka může být alespoň některé takové cesty osobám v objektu zablokovat. V takovém případě je analýza evakuačního procesu prostřednictvím numerické simulace velmi efektivním nástrojem pro analýzu dopadů takového scénáře.

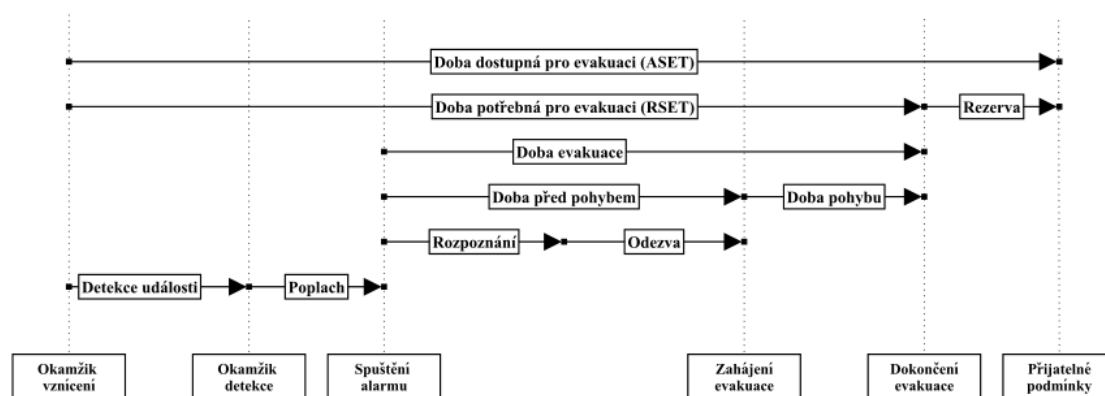
2 Základy procesu evakuace

Cílem evakuačního procesu je zajistit, aby osoby uvnitř postiženého objektu (tunelu) byly schopny v případě kritické situace (např. žhářský útok) tento objekt opustit a přesunout se do bezpečného místa, nebo zůstat na místě nezasaženém požárem nebo útokem po dobu nezbytnou pro jeho potlačení. To vše bez vystavení životu či zdraví nebezpečným podmínkám, či dokonce bez uvědomění si jejich existence. Taková situace představuje ideální řešení požární bezpečnosti.

Požadavek na nulové vystavení evakuovaných osob účinkům požáru může znamenat zásadní komplikace při návrhu dotčeného objektu. Efektivnější přístup k řešení požární bezpečnosti proto představuje hledání takové úrovně expozice, která umožní efektivní evakuaci osob, a zároveň neznamená ohrožení evakuačního procesu ani zdraví evakuovaných osob. Uvedený postup znamená nutnost časového hodnocení dopadu návrhového požárního scénáře na evakuované osoby z hlediska jejich místa a podmínek.

2.1 Doba pro evakuaci osob

Predikce pohybu osob v průběhu evakuace je základním postupem při analýze efektivity zabezpečení. Obecně platí, že dostatečná ochrana je zajištěna v případě, kdy doba potřebná pro evakuaci (Required Safe Egress Time - RSET) je kratší než doba dostupná pro evakuaci (Available Safe Egress Time - ASET). Vzájemné vztahy mezi jednotlivými složkami doby potřebné a dostupné pro evakuaci jsou zachyceny na obr. 1.



Obr. 1 Struktura evakuačního procesu.

2.2 Doba dostupná pro evakuaci (ASET)

Doba dostupná pro evakuaci představuje časový interval, po který panují v místě evakuace přijatelné podmínky pro evakuované osoby. Příklad stanovení takových podmínek může být následující:

- viditelnost přesahuje 10 metrů,
- koncentrace CO nepřesahuje 950 ppm,
- teplota vzduchu nepřesahuje 80 °C ve výšce 2 metry.

Pro stanovení hodnot vybraných veličin po dobu evakuace je vhodné použít požární model, přičemž přijatelné podmínky trvají až do okamžiku, kdy libovolná z vybraných hodnot poprvé překročí stanovený limit. Při stanovení limitu pro přijatelné podmínky využíváme některý z obecně uznávaných zdrojů, např. (Hurley, 2015, Smith, 2010).

2.3 Doba potřebná pro evakuaci (RSET)

Doba potřebná pro evakuaci je komplexní veličina, která je složena z řady dalších dílčích intervalů. Nejistota jejich stanovení může znamenat výrazné prodloužení celkové doby potřebné pro evakuaci a vyčerpání časové rezervy mezi dokončením evakuace a limitem pro přijatelné podmínky v budově, případně překročení tohoto limitu a ohrožení unikajících osob. Celková doba potřebná pro evakuaci se skládá dle obr. 1 z následujících základních časových intervalů:

- doba detekce události,
- doba spuštění poplachu,
- doba evakuace.

Doba detekce události je časový interval, který uplyne mezi vznícením požáru a jeho detekcí příslušným protipožárním zabezpečením, personálem budovy nebo jejími obyvateli. Pro určení tohoto časového intervalu lze požit požární model podobně jako v případě stanovení doby dostupné pro evakuaci, kdy hledáme okamžik překročení kritické hodnoty některé z veličin, které jsou pro detekci požáru rozhodující.

Doba spuštění poplachu závisí především na způsobu detekce požáru. Reakční doba elektronického protipožárního systému bude výrazně kratší než reakce obslužného personálu.

Doba evakuace závisí především na podrobné znalosti lidského chování v krizových situacích a pro její určení jsou využívány pokročilé softwarové modely. Většina z těchto modelů pracuje samostatně s dobou před pohybem a dobou pohybu osob.

Dobu před pohybem chápeme jako časový interval od okamžiku, kdy je konkrétní osoba na základě vzniklé situace poprvé vystavena vnějším podnětům (alarm, kouř, teplota apod.) až do okamžiku, kdy zahájí samotnou evakuaci na bezpečné místo. Doba pohybu pak představuje časovou náročnost dokončení procesu evakuace na bezpečné místo.

Existence spolehlivých údajů o předpokládané době před pohybem v různých situacích a zahrnutí těchto údajů do modelů chování při úniku je zcela zásadním předpokladem pro posouzení doby RSET a tato oblast je v současné době předmětem intenzivního výzkumu (Purser, 1998, Kobes, 2010, McConnell, 2010, Lovreglio, 61). Analýza konkrétních incidentů ukazuje, že existuje korelace mezi délkou doby před pohybem osob a následky tohoto incidentu v podobě zraněných či usmrcených osob [59].

Další studie jsou zaměřeny na vlivy sociální a fyziky prostředí (externí faktory) a na charakteristické vlastnosti osob (interní faktory) (DiNenno, 2002, Sherman, 2011, Kuligowski, 2009). Dosud nicméně platí, že znalosti o chování osob před pohybem jsou méně rozsáhlé než v případě samotného pohybu během evakuace (Proulx, 2001, Kobes, 2010). Zároveň je skutečností, že většina existujících evakuačních modelů aplikuje jednoduché předpoklady o chování osob v době před pohybem, nejčastěji v podobě prosté reakční doby na alarm. V takovém případě je doporučeno použít statistické rozdělení reakční doby mezi jednotlivé evakuované osoby, nejčastěji aplikováno a doporučeno je rovnoměrné, normální nebo lognormální rozdělení reakční doby.

Tyto skutečnosti je proto nutné při aplikaci reakční doby jako jednoho ze základních vstupních údajů modelů pohybu osob neustále zohledňovat a dobu před pohybem chápat jako komplexní, špatně empiricky měřitelnou a extrémně variabilní veličinu se zásadním dopadem

na dobu evakuace jako celku. Zanedbání této skutečnosti může mít fatální dopady na posouzení evakuačního-ho procesu jako celku a vést ke zcela nerealistickým předpokladům.

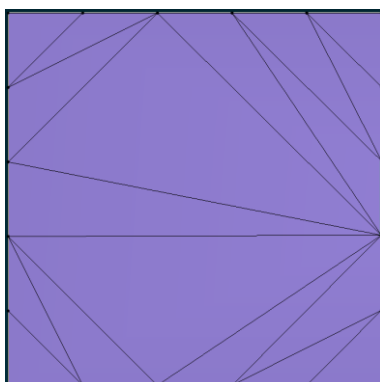
Analýza doby pohybu je zaměřena na posouzení doby potřebné pro evakuaci osob do bezpečného místa. Konkrétní výsledek bude závislý na celé řadě vstupních údajů, mezi které patří zejména dispozice budovy, znalost budovy jejími obyvateli, místo požáru a způsob řízení požární bezpečnosti.

Pro posouzení doby pohybu je možné aplikovat modely pohybu osob na základě existujících informací a složitosti situace. Takto lze analyzovat proces evakuace a jeho časovou náročnost s dostatečnou přesností, studovat variantní řešení uspořádání prostoru, rozložení únikových východů apod.

3 Numerický model evakuace

Pro analýzu evakuačního procesu v případě uzavření vybrané trasy typizovaného prostoru metra byl využit softwarový nástroj Pathfinder. Jde o analytický nástroj vyvíjený firmou Thunderhead Engineering, Inc. Nástroj je založen na agentní technologii, je využitelný pro simulaci evakuace i volného pohybu osob a skládá se ze tří hlavních modulů: grafického uživatelského rozhraní pro tvorbu modelu, simulátoru pro jeho simulaci, a 3D vizualizačního nástroje.

Model pracuje na dvojrozměrné spojitě síti sestavené z trojúhelníkových ploch, na kterých probíhá pohyb osob bez nějakého technického, výpočetního nebo prostorového omezení, jak tomu je u modelů s diskretní sítí (obr. 2).

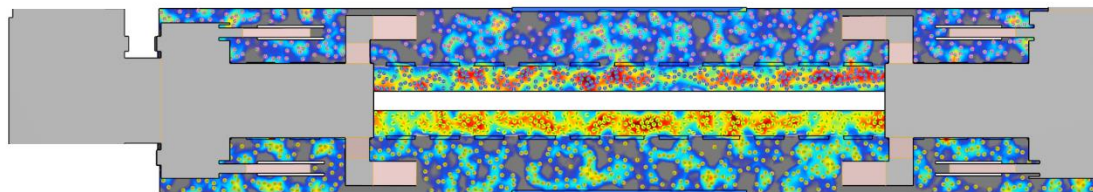


Obr. 2 Model pracuje se spojitým prostorem, který je složen z trojúhelníkových segmentů.

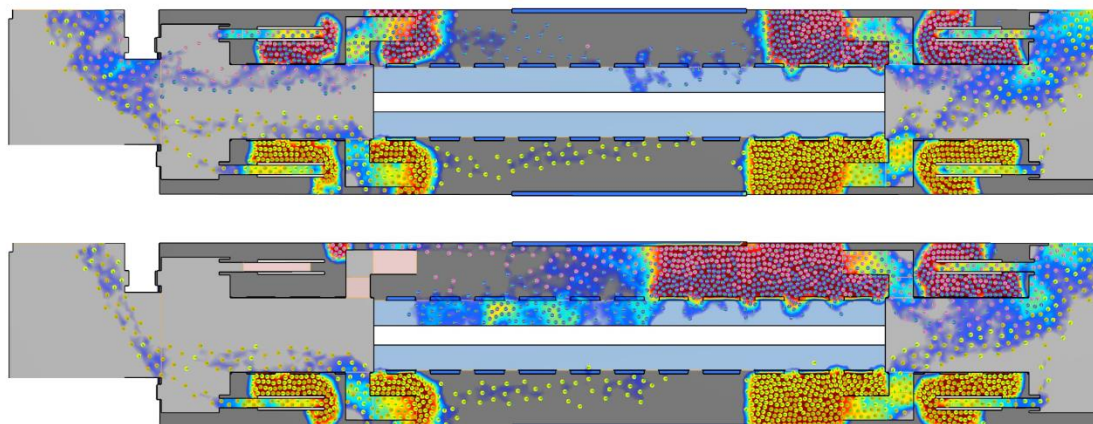
Nástroj při modelování pohybu osob pracuje se dvěma základními přístupy: režimem SFPE a režimem inverzního řízení (steering). Režim SFPE vychází z konceptu založeného na modelu proudění, kdy je pohyb osob v modelu ovlivněn především hustotou osob v jednotlivých místnostech, pro pohyb osob únikovými východy je pak určující především jejich šířka. Přestože se tedy jedná o agentní model, jeho fundamentální principy jsou blízké makroskopickým modelům. Režim inverzního řízení předpokládá, že si každá jednotlivá osoba určí svoji trajektorii k cíli a na základě následných událostí ji průběžně v jednotlivých výpočetních krocích přehodnocuje.

4 Model objektu

Pro účely demonstrace byl využit typizovaný model stanice metra, který obsahuje dvě nástupiště, na každém pak dva eskalátory a dvě schodiště. Ve stanici jsou umístěny dvě plně obsazené vlakové soupravy a rovněž nástupiště obsahuje náhodně rozmístěné cestující. Celkový počet osob v objektu je přibližně 2 000, půdorys objektu je zachycen na obr. 3.



Obr. 3 Půdorys typizovaného modelu metra. Barevná škála vyjadřuje lokální hustotu osob.



Obr. 4 Výsledek simulace evakuace osob z typizované stanice ve stejném čase v případě dostupnosti všech únikových cest (nahore) a v případě uzavření levého horního schodiště (dole).

Na obr. 4 je pak zobrazeno srovnání variant pro simulaci evakuace osob z této modelové stanice v případě dostupnosti všech evakuačních tras a v případě uzavření jedné z nich. Z výsledků je jasně patrné, že průběh evakuačního procesu bude v obou případech odlišný. V objektu budou osoby v průběhu vyklizení rozloženy jiným způsobem a v jiném čase. Evakuační čas bude také výrazně jiný, v tomto případě se lišil o více než 20 %. Samotná odlišnost těchto výsledků není samozřejmě nijak překvapivá, konkrétní hodnoty nicméně z projektové dokumentace ani požárně bezpečnostního řešení často není možné jednoduše určit a zpracování evakuačního modelu tak představuje prakticky jediný dostatečně efektivní způsob analýzy účinků napadení objektu případným útočником.

2.4 Úroveň kvality pěší dopravy

Kromě evakuačního času je třeba brát v potaz také lokální hustotu osob jako důležitý rizikový faktor. Platí, že riziková úroveň hustoty je odlišná pro stojící a pohybující se skupinu osob. Při překročení kritické úrovně lokální hustoty dramaticky roste riziko zranění nebo dokonce úmrtí jednotlivce či skupiny osob v důsledku mechanických poranění (nejčastěji fraktury) nebo udušení způsobené nemožností pohybu bránice.

Výše popsaná rizika spojená s vysokou hustotou osob, která vzniká jako důsledek samotného evakuačního procesu a konkrétní geometrie modelovaného prostoru (např. nouzový východ z tunelu), jsou pokročilé modely evakuace osob schopny vyhodnotit. Klíčovou metrikou tohoto posouzení je tzv. úroveň kvality pěší dopravy [68].

Pojem úroveň kvality má svůj původ v dopravním inženýrství, kde je používán také pod originálním názvem Level of Service (LoS). Jde o kvalitativní vyjádření situace na dopravní síti pomocí zjednodušené stupnice A-F. Úroveň kvality dopravy A znamená volnou dopravu, kdy se jednotliví aktéři vzájemně neovlivňují a pohybují se rychlostí blízkou maximální hodnotě, úroveň F pak znamená opačnou situaci, kdy se účastníci dopravy vlivem vysoké

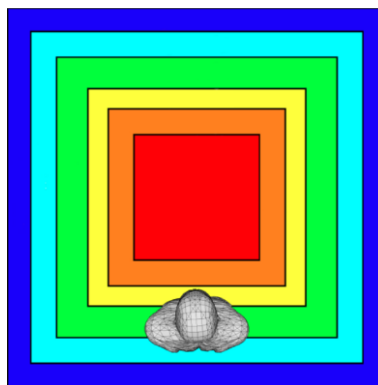
hustoty pohybují velmi pomalu či zcela zastaví. Metrika původně určená pro motorovou dopravu se postupně rozšířila do řady dalších oblastí včetně pěší přepravy.

V odborné literatuře existuje celá řada konkrétních metod pro stanovení úrovně kvality dopravy. Inženýrská praxe široce akceptuje metodu vyvinutou Fruinem (Fruin, 1971), která rozlišuje jednotlivé úrovně pro chodníky, schodiště a čekací plochy vlivem různých dynamických vlastností pěšího proudu, popsanych v předchozí kapitole. Konkrétní číselné vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro úrovně kvality pěší dopravy jsou v tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení úrovní kvality pěší dopravy podle typu komunikace a hustoty osob (Fruin, 1971).

Chodníky		Schody a rampy		Čekací plochy		Úroveň
Min [os.m ⁻²]	Max [os.m ⁻²]	Min [os.m ⁻²]	Max [os.m ⁻²]	Min [os.m ⁻²]	Max [os.m ⁻²]	
0	0,308	0	0,538	0	0,828	A
0,308	0,431	0,538	0,718	0,828	1,076	B
0,431	0,718	0,718	1,076	1,076	1,538	C
0,718	1,076	1,076	1,538	1,538	3,588	D
1,076	2,153	1,538	2,691	3,588	5,382	E
2,153	-	2,691	-	5,382	-	F

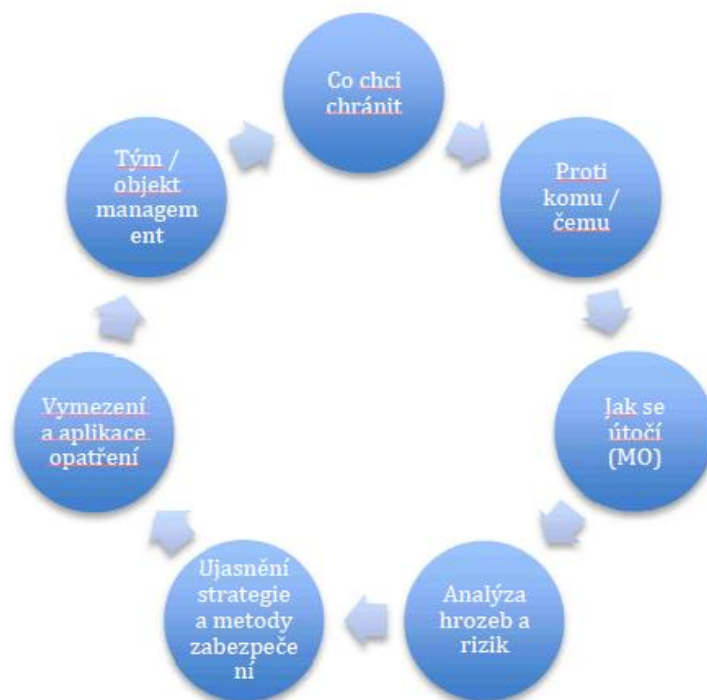
Z tabulky 1 vyplývá, že hodnoty se mezi chodníky a čekacími plochami velmi liší. Zatímco v případě chodníku je nejvyšší stupeň F dosažen pro hustotu přibližně 2,2 osob.m⁻², v případě čekací plochy je tato hodnota přibližně 5,4 osob.m⁻², tedy dvojnásobná. Pro lepší představu, jaké prostorové nároky jednotlivé hodnoty znamenají, je na obr. 5 graficky vyjádřena prostorová náročnost jednotlivých úrovní kvality pěší dopravy vzhledem k půdorysu stojící osoby.



Obr. 5 Grafické vyjádření prostorové náročnosti jednotlivých úrovní kvality pěší dopravy vzhledem k půdorysu stojící osoby od úrovně A (modrá) po úroveň F (červená). Rozměry odpovídají úrovním kvality pěší dopravy na chodníku [68].

5 Závěr

Aplikací numerického modelu osob v procesu ochrany měkkých cílů naplňujeme v procesu ochrany měkkých cílů (obr. 6) zejména fázi analýzy hrozeb a rizik. Vstupními údaji pro tuto fázi a aplikaci modelu je model útoku (MO), který přímo definuje scénář napadení a tedy okrajové podmínky modelu evakuace (např. úmyslné uzavření některé z únikových cest).



Obr. 6 Proces ochrany měkkých cílů.

Výsledky modelu evakuace pak představují vstupní údaje pro ujasnění strategie a metody zabezpečení objektu a stanovení nezbytných protiopatření (umístění ostražky, navigačních prvků apod.). Často se pak vracíme k verifikaci těchto opatření pomocí upraveného modelu a jeho okrajových podmínek. V případě, že je studovaný objekt teprve ve fázi návrhu, přistupujeme rovněž k úpravě dílčích částí návrhu, které umožní další snížení evakuačního času a zejména snížení kongescí, které jsou rovněž velmi významným rizikovým faktorem.

Literatura

- DiNenno, P. J. (ed), SFPE Handbook of fire protection engineering. Third edition. National Fire Protection Association, 2002, s. 3342-3366.
- DiNenno, P. J. D. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Movement of People: The Evacuation Timing. National Fire Protection Association, 2002, s. 3342-3366.
- Fire Protection Association, Inc., Quincy, Massachusetts 02269, 2002. ISBN: 087765-451-4.
- Fruin, J. J.: Pedestrian Planning and Design. Elevator World, Inc., 1971.
- Hurley, M. J. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer, 2015.
- Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; aj.: Building Safety and Human Behaviour in Fire: A Literature Review. Fire Safety Journal, ročník 45, 2010: s. 141.
- Kuligowski, E. D.; Mileti, S.: Modelling Pre-Evacuation Delay by Occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001. Fire Safety Journal, ročník 44, č. 4, 2009: s. 487-496.
- Lovreglio, R.; Ronchi, E.; Nilsson, D.: A Model of the Decision-Making Process During Pre-Evacuation. Fire Safety Journal, ročník 78, 2015: s. 168-179.
- McConnell, N. C.; Boyce, K. E.; Shields, J.; aj.: The UK 9/11 Evacuation Study: Analysis of Survivor's Recognition and Response Phase. Fire Safety Journal, ročník 45, 2010: s. 21-34.
- Proulx, G.: High-Rise Evacuation: A Questionable Concept. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire, 2001.
- Purser, D. A.; Bensilum, M.: Quantification of Behaviour for Engineering Design Standards and Escape Time Calculations. In Human Behaviour in Fire 1998, 1998.

Sherman, M. F.; Peyrot, M.; Magda, L. A.; aj.: Modelling Pre-Evacuation Delay by Evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A Revisit Using Regression Analysis. *Fire Safety Journal*, ročník 46, č. 7, 2011: s. 414-424.

Smith, D. B.: *Fire Safety Engineering (CIBSE Guide E)*. CIBSE, 2010.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory interního projektu Vysokého učení technického v Brně s reg. číslem FAST-S-18-5327.