

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

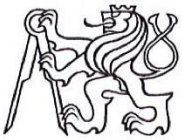
CITLIVOSTNÍ ANALÝZA MODELŮ EVAKUACE OSOB Z VLAKOVÉHO VOZU

SENSITIVE ANALYSIS OF EVACUATION MODELS FROM A TRAIN
VEHICLE

Bc. Lukáš Kuklík

Vedoucí práce Ing. Hana Najmanová

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kuklík Jméno: Lukáš Osobní číslo: 424384
Zadávací katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: CITLIVOSTNÍ ANALÝZA MODELŮ EVAKUACE OSOB Z VLAKOVÉHO VOZU
Název diplomové práce anglicky: SENSITIVE ANALYSIS OF EVACUATION MODELS FROM A TRAIN VEHICLE

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s aktuálním stavem poznání a terminologií problematiky citlivostní analýzy v prostředí požární bezpečnosti, zejména v návaznosti na řešení evakuace osob. Proved'te literární rešerši se zaměřením na dostupné informace o matematickém modelování evakuace osob z železničních vozidel. Ve vybraných evakuačních modelech analyzujte mimořádný výstup osob z železničního vozu CityElefant. Na základě průzkumu vyberte vhodný nástroj, s jehož použitím proved'te citlivostní analýzu provedeného matematické modelování. Získané poznatky vyhodno'te, mimo jiné formou komparativní studie s experimentálními daty.

Seznam doporučené literatury:


MARKOS, Stephanie H. a John K. POLLARD. Passenger train emergency systems: review of egress variables and egress simulation models. Federal Railroad Administration. Office of Research and Development. 2013.
CAPOTE, Jorge A., Daniel ALVEAR, Orlando ABREU, Arturo CUESTA a Virginia ALONSO. A Stochastic Approach for Simulating Human Behaviour During Evacuation Process in Passenger Trains. Fire Technology [online]. 2012, 48(4), 911–925. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-012-0251-3
DUIVES, Dorine C., Winnie DAAMEN a Serge P. HOOGENDOORN. Continuum modelling of pedestrian flows — Part 2: Sensitivity analysis featuring crowd movement phenomena. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications [online]. 2016, 447, 36–48. ISSN 0378-4371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2015.11.025

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Hana Najmanová

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

02.10.2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Lukáš Kuklík

Název diplomové práce: CITLIVOSTNÍ ANALÝZA MODELŮ EVAKUACE OSOB
Z VLAKOVÉHO VOZU

Základní část: Požární bezpečnost podíl: 100 %

Formulace úkolů: Seznámit se s problematikou citlivostní analýzy v požární bezpečnosti.

Provést literární rešerši na matematické modelování evakuace osob z železničních vozidel.

Ve vybraných evakuačních modelech analyzovat mimořádný výstup z jednotky CityElefant.

Vybrat a použít nástroj pro provedení citlivostní analýzy matematického modelování.

Vyhodnotit výsledky, mimo jiné formou komparace s experimentálními daty.

Podpis vedoucího DP: Datum: 01.10.2018

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité informační zdroje. Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6. ledna 2019

Bc. Lukáš Kuklík

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat paní Ing. Haně Najmanové za vedení diplomové práce, vstřícný přístup a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Danielovi Vašatovi, Ph.D. a Ing. Pavlovi Hrabákovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc s řešením citlivostní analýzy. Další poděkování patří VÚKV a.s. jmenovitě panu Ing. Jiřímu Jelénkovi, za jejichž podpory byl uskutečněn řízený experiment evakuace z vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 CityElefant, jímž získaná data jsou využita v této diplomové práci. Zvláštní poděkování patří Bc. Veronice Peškové za spolupráci při organizaci a přípravě experimentu a za poznatky a komentáře k analyzovaným experimentálním datům, která jsou v této práci využita pro validaci modelu a podrobnou citlivostní analýzu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem figurantům a organizátorům, kteří se účastnili řízeného experimentu a také své rodině za podporu, zejména rodičům, kteří mi poskytli skvělé podmínky ke studiu.

Úvodní slovo vedoucího diplomové práce

V moderní době požárního inženýrství je pozornost stále vyšší měrou zaměřována na nástroje matematického modelování a v této návaznosti i na relevantní vstupní data. Výjimkou není ani problematika evakuace osob z železničních vozidel, představující při hodnocení i modelování pohybu osob značné výzvy.

Vzhledem k tomu, že tato oblast výzkumu, která mimo jiné zahrnuje evakuační experiment z vlakového vozu, je svým rozsahem značně náročná, bylo její zpracování rozděleno do dvou vzájemně propojených diplomových prací:

- **Hodnocení evakuace osob z vlakového vozu CityElefant**, zpracované Bc. Veronikou Peškovou, a
- **Citlivostní analýza modelů evakuace osob z vlakového vozu**, zpracované Bc. Lukášem Kuklíkem.

Společným základem obou diplomových prací je návrh a realizace výše zmíněného evakuačního experimentu, na kterém se oba autoři podíleli společně. Analýza a vyhodnocení získaných experimentálních dat je dále předmětem praktické části diplomové práce *Hodnocení evakuace osob z vlakového vozu CityElefant*. Využití a validace matematického modelu za pomoci experimentálních dat, modelování rozšířených evakuačních scénářů a citlivostní analýza matematických modelů je náplní praktické části diplomové práce *Citlivostní analýza modelů evakuace osob z vlakového vozu*.

Za účelem ucelení získaných poznatků v obou diplomových pracích jsou jejich dílčí výsledky navzájem využívány, a z tohoto důvodu je možné, že se v diplomových pracích objevují tematicky podobné kapitoly. V částech diplomových prací, kde dochází k vzájemnému využití dat, jsou tato místa označena v souladu se základními pravidly citační etiky.

Obsah

Abstrakt	IX
Abstract	X
Seznam použitých symbolů a zkratk	XI
1 Úvod	12
1.1 Motivace	12
1.2 Cíle práce	12
1.3 Struktura práce	13
2 Současný stav poznání	14
2.1 Citlivostní analýza	14
2.2 Citlivostní analýza v požární bezpečnosti	16
2.2.1 Raná historie citlivostní analýzy modelů	16
2.2.2 Moderní citlivostní analýza	17
2.2.3 Citlivostní analýza evakuačních modelů	17
2.2.4 Závěr	18
2.3 Matematické modelování evakuace z vlaků	19
2.3.1 Počítačové evakuační modely	19
2.3.2 Vstupní data pro výpočet evakuačního času z vlaků	20
2.3.3 Přehled uskutečněných matematických simulací evakuace z vlaku	23
2.3.4 Závěr	26
3 Citlivostní analýza modelu evakuace	27
3.1 Modelová situace – evakuace z vlaku CityElefant	27
3.2 Evakuační experiment	28
3.2.1 Parametry vozu	29
3.2.2 Evakuační scénáře	30
3.2.3 Specifikace figurantů	31
3.2.4 Specifikace šířky nástupního prostoru	32
3.2.5 Specifikace výstupů	32
3.2.6 Pokyny figurantům	34
3.2.7 Shrnutí	34
3.3 Matematické modelování evakuace osob z železničního vozidla	35
3.3.1 Základní informace o evakuačním programu Pathfinder	35
3.3.2 Modelové evakuační scénáře	36
3.3.3 Geometrie modelovaného prostoru	36
3.3.4 Parametry a umístění modelovaných agentů	38
3.3.5 Výstupy	41
3.3.6 Výsledky a porovnání s experimentálními daty	43
3.3.7 Validace modelu evakuace	53
3.3.8 Shrnutí výsledků	55
3.4 Citlivostní analýza základní modelové situace	56
3.4.1 Použitý nástroj pro citlivostní analýzu	56
3.4.2 Citlivostní analýza validovaného modelu evakuace	56

3.4.3	Citlivostní analýza výsledků evakuačního experimentu.....	61
3.4.4	Shrnutí.....	62
3.5	Citlivostní analýza modelové situace s jemnější škálou parametrů.....	63
3.5.1	Citlivostní analýza modelu evakuace rozšířené o další evakuační scénáře	63
3.5.2	Citlivostní analýza modelu evakuace s přijatelnými evakuačními scénáři.....	68
3.5.3	Shrnutí.....	69
3.6	Citlivostní analýza dalších parametrů modelu evakuace	70
3.7	Shrnutí a diskuze citlivostní analýzy modelů evakuace.....	72
4	Závěr	73
	Seznam obrázků.....	75
	Seznam tabulek	78
	Literatura	79
	Příloha – obrázková příloha	82

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá citlivostní analýzou v požární bezpečnosti, konkrétně citlivostní analýzou modelů evakuace osob z vlakových vozů. Práce se skládá ze dvou stěžejních částí. V první části je uveden přehled současného stavu poznání v oblasti citlivostní analýzy v požární bezpečnosti a matematického modelování evakuace osob z kolejových vozidel. V této části jsou shrnuty dřívější významné výzkumy, ale i moderní současné metody a aplikace citlivostní analýzy. Z matematického modelování evakuace jsou zde popsány druhy počítačových modelů, vyjmenovány možné vstupní parametry a shrnuty již provedené počítačové simulace evakuace z vlakových vozů. Druhou částí diplomové práce je citlivostní analýza modelu evakuace vytvořeného v programu Pathfinder, která je rozdělena do tří dílčích kroků. Prvním krokem je vytvoření modelu evakuace, jeho validace a získání výsledných dat předem určených evakuačních scénářů, které byly realizovány v rámci evakuačního experimentu. V druhém kroku je provedena citlivostní analýza vlivu vybraných vstupních parametrů evakuačních scénářů na celkový evakuační čas. Citlivostní analýza je provedena v programu optiSLang jak pro modelované, tak pro experimentální data. Základními zkoumanými parametry jsou složení skupiny osob, typ výstupu z vlakového vozu a šířka nástupního prostoru vlakového vozu. Posledním krokem je provedení citlivostní analýzy dalších vstupních parametrů rozšířeného modelu evakuace nad rámec validovaných evakuačních scénářů.

Klíčová slova

Požární bezpečnost; evakuace; kolejová vozidla; příměstský vlak; osobní vlak; Pathfinder; citlivostní analýza; optiSLang; evakuační model; doba evakuace

Abstract

This diploma thesis examines the possible utilization of sensitivity analysis within fire safety, particularly in the evacuation models of railway vehicles. The thesis comprises two main parts. The first part provides a comprehensive overview of previously conducted research on fire safety and current methods and applications of sensitivity analyses, as well as summarizes prior studies on computer simulations of train evacuations and describes different types of mathematical models together with their input parameters. The second part of the thesis then presents the sensitivity analysis of an evacuation model created using Pathfinder software, this part is divided into three sub-sections. The first sub-section describes the evacuation model and its validation against experimental results obtained from different evacuation scenarios. Next sub-section contains the performed sensitivity analysis and quantifies the influence of selected input parameters on the total evacuation time. The analysis was conducted using optiSLang software for both model and experimental dataset. The examined parameters were: the composition of the controlled group, the type of the train vehicle exit and the width of the entrance space. In the final sub-section, the sensitivity analysis was extended to include additional input parameters beyond the examined evacuation scenarios.

Keywords

Fire safety; evacuation; railway vehicles; commuter train; passenger train; Pathfinder; sensitivity analysis; optiSLang; evacuation models; total evacuation time

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

S_j	systemový derivát
X_j	vstupní faktor
Y	zkoumaný výstup

Řecké symboly

∂	derivace
------------	----------

Zkratky

ASET	Available safe egress time
ASET-B	(software)
CAD	Computer-aided drafting
CFAST	Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (software)
CoP	Coefficients of prognosis
ČVUT	České vysoké učení technické
ČR	Česká republika
FAST	Fire Growth and Smoke Transport Modeling (software)
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
FRA	Federal Railroad Administration (organizace)
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (organizace)
ISIS	(software)
MOP	Meta-model of Optimal Prognosis
RSET	Required available safe egress time
SFPE	The Society of Fire Protection Engineers (organizace)
STEPS	(software)
USA	Spojené státy americké
US DOT	U.S. The Department of Transportation (organizace)
VÚKV a.s.	Výzkumný ústav kolejových vozidel (organizace)

1 Úvod

1.1 Motivace

Matematické evakuační modely se v současné době používají stále častěji, a to díky jejich finanční a časové úspornosti, dostupnosti a širokému spektru použitelnosti. Za pomoci matematického modelování lze simulovat evakuaci např. vlaku bez organizačně, časově a finančně náročných fyzických zkoušek, při kterých hrozí i riziko zranění účastníků. Současné jsou však dnešní moderní nástroje sloužící ke stanovení průběhu a celkové doby evakuace omezeny nejistotami a vstupními parametry stejně jako jakékoliv jiné nástroje sloužící k předpovědi za pomoci modelů. K objasnění těchto parametrů slouží i u matematických evakuačních modelů analýza nejistot a citlivostní analýza. Výzkum u modelování evakuace z vlaků však v této oblasti mírně zaostává. Ačkoliv v omezeném prostoru vlaku, ve kterém může být snižena viditelnost a nacházet se zde různě pohybliví lidé, a který se může nacházet v různém prostředí (např. volný terén, tunel, most), je velké množství nejistot a vstupních parametrů. Nevýhodou matematického modelování je riziko chybného použití těchto nástrojů uživatelem. Za předpokladu vhodného postupu může být dalším omezením obtížné získávání relevantních dat vstupních parametrů. Zefektivnění tohoto procesu by bylo určit několik vstupních parametrů, které mají významný vliv na sledovaný výstupní parametr. Díky tomu by bylo možné zaměřit se především na tyto parametry a stanovit pro ně přesnější data a tím i zpřesnit výsledky simulace. Pro odhalení těchto významných vstupních parametrů lze využít nástroje citlivostní analýzy.

1.2 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je představit současný stav poznání o citlivostní analýze v požární bezpečnosti a matematicém modelování evakuace z vlaků. Dále pak ve vybraném evakuačním modelu analyzovat nouzový výstup z vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 CityElefant, vyhodnotit výsledky za pomoci citlivostní analýzy modelu evakuace a odhalit tak významné vstupní parametry, které mají vliv na průběh a celkový čas evakuace. Pro odhalení významných vstupních parametrů jsou uvažovány následující dílčí cíle, které jsou v diplomové práci provedeny a popsány, přičemž některé jsou podrobně popsány v rámci související diplomové práce Hodnocení evakuace osob z vlakového vozu CityElefant [1]:

- stanovení základních zkoumaných vstupních parametrů;
- stanovení experimentálních evakuačních scénářů;
- popis geometrie vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471, typů výstupů z vlakového vozu a cestujících;
- návrh, příprava a realizace evakuačního experimentu z vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471;

- vytvoření modelu vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 v programu Pathfinder;
- vyhodnocení a validace modelu evakuace použitím dat získaných z evakuačního experimentu;
- provedení citlivostní analýzy základních zkoumaných vstupních parametrů validovaného modelu evakuace a evakuačního experimentu;
- provedení citlivostní analýzy dalších vstupních parametrů modelu evakuace rozšířeného o další evakuační scénáře;
- diskuze a stanovení významných vstupních parametrů.

1.3 Struktura práce

Práce je rozdělena do čtyř kapitol. První kapitola je úvodem do problematiky modelování evakuace z kolejových vozidel a uvádí cíle a strukturu práce. Druhá kapitola se zabývá současným stavem poznání o citlivostní analýze v požární bezpečnosti a o matematickém modelování evakuace z vlaků. Třetí kapitola je stěžejní část této diplomové práce. Zahrnuje vytvoření modelové situace nouzového výstupu z vlakového vozu v evakuačním modelu Pathfinder, porovnání získaných výsledků s experimentálními daty (validací modelu) a provedení citlivostní analýzy modelu evakuace a evakuačního experimentu. Poslední kapitolou je shrnutí výsledků a závěr diplomové práce.

2 Současný stav poznání

Tato část práce se zabývá současným stavem poznání citlivostní analýzy v požární bezpečnosti a matematickým modelováním evakuace osob z kolejových vozidel. Matematické modelování evakuace je moderní a stále užitečnější nástroj. Důvodem stále častějšího užívání počítačových evakuačních modelů ve vývoji vlaků je, že fyzické evakuační zkoušky mají řadu omezení [2]. Studie fyzických evakuačních zkoušek jsou nákladné z hlediska financí a času, neboť zahrnují tvorbu repliky navrhovaného vlaku. V případě, že by se konstrukce vlaku během vývoje výrazně změnila, mohlo by to vyžadovat opakované fyzické zkoušky, které zpomalují vývojový plán. Dalším důvodem je omezený počet scénářů kvůli fyzickým omezením a zdrojům potřebných pro provádění takovýchto zkoušek, např. organizace účastníků zkoušky, anebo omezené nahrávání dat, které může být náročné a vyžaduje významné množství nahrávací techniky pro shromažďování údajů. Z toho důvodu jsou často zaznamenávány pouze celkové časy evakuace, nikoliv však data pro dostatečné pochopení dynamiky evakuace. V neposlední řadě je důvodem bezpečnost účastníků evakuační zkoušky. Při jakémkoli evakuačním testu, kdy je nutné evakuovat současně více lidí, hrozí větší riziko zranění, např. uklouznutím, zakopnutím nebo pádem. Za pomoci matematického modelování evakuace lze vytvořit nespočet evakuačních scénářů, získávat mimo celkový čas evakuace i data k pochopení dynamiky evakuace, a to za nižší finanční i časové náročnosti. Nevýhodou matematického modelování je riziko chybného použití těchto nástrojů uživatelem. Za předpokladu vhodného postupu může být dalším omezením obtížné získávání relevantních dat vstupních parametrů. Zefektivnění tohoto procesu by bylo určit několik vstupních parametrů, které mají významný vliv na sledovaný výstupní parametr. Díky tomu by bylo možné zaměřit se především na tyto parametry a stanovit pro ně přesnější data a tím i zpřesnit výsledky simulace. Pro odhalení těchto významných vstupních parametrů lze využít nástroje citlivostní analýzy.

2.1 Citlivostní analýza

Citlivostní analýza je studie o tom, jak nejistota ve výstupu modelu (numerická nebo jiná) může být způsobena různými zdroji nejistoty vstupů do modelu [3]. Termín citlivostní analýza je v různých technických komunitách a v řešených problémech rozdílně interpretován. Přesnější definice tohoto termínu vyžaduje, aby byl výstup analýzy upřesněn [4]. Až do nedávné doby byla citlivostní analýza koncipována jako lokální měřítko vlivu daného vstupu na daný výstup. Toho je obvykle dosaženo výpočtem přímým nebo nepřímým přístupem systémovými deriváty, jako je rovnice (1), kde Y je zkoumaným výstupem a X_j vstupním faktorem.

$$S_j = \frac{\partial Y}{\partial X_j} \quad (1)$$

Lokální přístup je cenný pro skupinu problémů, které mohou být volně definovány jako "inverzní", tj. určení některých fyzických parametrů zpracovaných do komplexního modelu

z experimentálního určení pozorovatelných znaků, které jsou také v modelu. Tento přístup je stále poměrně rozšířený. Většina citlivostních analýz, které lze nalézt ve vědeckých člancích je lokální, a to někdy i nevhodně [5].

Řešení problematiky je rozdílné pro odborníky, kteří se zabývají analýzou rizik, podporou rozhodování, hodnocením vlivů, rozšířeným posouzením dopadu apod. Pro tyto druhy je stupeň variace vstupních faktorů významný, neboť jedním z výstupů, o které je v analýze usilováno je kvantitativní posouzení nejistoty kolem některé nejlépe odhadované hodnoty pro Y (analýza nejistoty). Toho lze dosáhnout v jednoduchých případech analytickým vyjádřením, ale obecně a nejčastěji je toho dosaženo metodami Monte Carlo ve spojení s různými strategiemi vzorkování. Analýza citlivosti je v tomto kontextu zaměřena mimo jiné na stanovení priorit a určení toho, který faktor nejvíce potřebuje přesnější určení a díky tomu lze identifikovat slabé články (ty, které šíří nejvíce rozptylu ve výstupu). Citlivostní analýza se v této souvislosti často provádí podle regresních technik, jako jsou standardizované regresní koeficienty. Regresní algoritmus vrací regresní meta-model, čímž je výstup Y popsán podmínkami lineární kombinace vstupních faktorů. Regresní koeficient pro daný faktor hraje roli měřítka citlivosti pro tento faktor. Výhodou regresní analýzy je, že je jednoduchá a má nízké výpočetní náklady.

Jak vyplývá z výše uvedeného, existuje více druhů citlivostních analýz. Podle jejich charakteru a různého účelu je lze dělit do tří skupin, například dle Saltelli et al. [3]. Nejjednoduššími jsou **lokální metody**, které jsou zaměřeny na jeden konkrétní bod v celém modelu. Mezi tyto metody patří například jednocestná citlivostní analýza. V případech, kdy je model tak komplikovaný a rozsáhlý, že není možné jiným způsobem citlivostní analýzu provést, se používají **screeningové metody** citlivostní analýzy. Tyto metody se používají v případech, kdy je v modelu nezbytné identifikovat nejdůležitější parametry. Hlavními požadavky na screeningové metody jsou výpočetní jednoduchost a zároveň poskytování kvalitních informací o tom, které parametry jsou fixní. Následně po identifikování nejdůležitějších parametrů mohou být modely dále zpracovávány výpočetně daleko náročnějšími metodami. Ty představují **globální metody**, které jsou nejkompaktnější a nejnáročnější. Globální metody se snaží objasnit celý prostor nebo alespoň část prostoru, kde je vysoce pravděpodobné, že se mohou pohybovat skutečné hodnoty těchto parametrů. Tyto metody poskytují nejpodrobnější informace o zkoumaném modelu, ale jsou také výpočetně nejnáročnější.

2.2 Citlivostní analýza v požární bezpečnosti

Účelem citlivostní analýzy je měřit vliv jedné nebo více vstupních proměnných matematického modelu na některé vybrané výstupní proměnné [6]. Provádí se změnou hodnot vstupů s cílem kvantifikovat vliv těchto změn na uvažované výstupy. V částech 2.2.1 a 2.2.2 jsou uvedeny počátky aplikace citlivostní analýzy v požární bezpečnosti, nové druhy citlivostní analýzy a jejich aplikace v současnosti. Část 2.2.3 je zaměřena na citlivostní analýzu evakuačních modelů a část 2.2.4 obsahuje shrnutí řešerše této problematiky.

2.2.1 Raná historie citlivostní analýzy modelů

V této kapitole jsou uvedeny a shrnuty dřívější publikace vztahující se k citlivostní analýze počítačových modelů v požární bezpečnosti. Tato kapitola je určena k ocenění současného stavu poznání a nesnaží se přednést vyčerpávající přehled dřívějších publikací.

Většina studií citlivostní analýzy v oblasti požární bezpečnosti byla provedena na zónových nebo analytických modelech. Jednou z prvních aplikací nástrojů citlivostní analýzy na počítačové modely se v roce 1982 zabýval Ndubizu a kol. pro model „liquid pool fire“ za použití programu FAST (předchůdce dnešního programu CFAST) [7].

V roce 1996 Fu a Fan zkoumali citlivost dvouzónového modelu pro požáry budov [8]. Citlivostní analýza byla provedena, aby se zjistily účinky některých modelových parametrů, a to konvektivní součinitel přestupu tepla, vodivost, šířka okna a šířka dveří na rychlost uvolňování tepla a strhávání prachu. V roce 1998 Bukowski a kol. studoval citlivost evakuačního modelu airEXODUS pro komerční letadla [9]. Jedním z cílů této studie bylo identifikovat ty proměnné, které mohou mít největší vliv na předpokládaný výstupní čas, a tedy i proměnné, které by měly být pečlivě kontrolovány, aby se zajistily spolehlivé odhady výstupního času. Tito autoři získali hodnoty citlivosti tím, že u každé z nich postupně změnili některé nominální hodnoty a poté vyhodnotili poměr procentní změny výstupu k procentuální změně vstupu.

Naproti tomu Peacock a kolektiv [10] odvodili soubor citlivostních rovnic z množiny rovnic z programu ASET-B, který použili k simulaci vývoje požáru a kouře v jedné místnosti. Následně tyto odvozené rovnice vyřešili a tím získali citlivosti parametrů, ale v článku také přiznávají, že pro složitější modely požáru může být tato metoda nekontrolovatelná.

Zajímavým přínosem byla v roce 2002 provedená citlivostní analýza jednoduchých analytických formulací pro odhad zvýšení teploty chráněných ocelových konstrukcí za požáru [11]. Práce zkoumala vliv tepelně izolačních vlastností materiálů na rychlost nárůstu teploty. Významnými vstupními parametry byly koeficienty přenosu tepla, tloušťka izolace a tepelné vlastnosti izolačních materiálů. Výsledky této citlivostní analýzy ukázaly, že pro izolaci s relativně vysokou hustotou a vysokou vodivostí (jako je beton), formulace Eurokódu 3 může poskytnout výsledky, které se významně liší od přesného řešení. Pomocí citlivostní analýzy bylo pro určité parametry upozorněno na omezení analytického modelu Eurokódu 3.

2.2.2 Moderní citlivostní analýza

Mezi moderní metody citlivostní analýzy lze zařadit výzkum uvedený v článku [12], kde byly představeny dvě nové moderní metody globální citlivostní analýzy pro počítačové modely: Fourier Amplitude a Sobol, stejně jako metoda moderní screeningové metody: Morrisova metoda. Metody byly aplikovány pro hodnocení bytového požárního modulu počítačového modelu CASERE-risk, který má osm vstupních faktorů a otevření dveří a oken. Sledovanými výstupními proměnnými byly maximální dosažená teplota a nástup neudržitelných podmínek. Pro maximální dosaženou teplotu se všechny tři metody shodovaly, že nejcitlivějšími faktory jsou změny výšky a šířky okna, následovány faktorem palivové plochy. Pro nástup neudržitelných podmínek byla jediným významným faktorem rychlost šíření plamene. Závěrem této práce je zjištění, že v důsledku analýz Fourier Amplitude and Sobol lze komplikovanou strukturu modelu CESARE-Risk značně zjednodušit a drasticky snížit množství vstupů. Pozornost tak může být zaměřena na několik vstupních parametrů s vysokou citlivostí.

V publikaci [13] z roku 2012 byla popsána analýza citlivosti pomocí dvouúrovňového kráceného faktoriálního pokusu. Byl použit model typu pole ISIS vyvinutý společností IRSN, ověřený pro požáry velkých prostorů. Jako požární scénář byl zvolen rozsáhlý požár vyvíjející se v mechanicky větraném prostoru. Vstupními zkoumanými parametry byly: účinnost spalování, koeficient absorpce sazí, parametry rozptylu víření a turbulentní viskozity, turbulentní čísla Prandtl/Schmidtovs čísla a turbulentní číslo Prandtl v souvislosti tvorby turbulence vyvolané vztlakem. Výstupními sledovanými parametry byly teplota plynu, koncentrace kyslíku, radiační a konvektivní toky. Ukázalo se, že zvolený návrh experimentu dosahuje stejných informací s 8 běhy, jako úplný faktoriální pokus s 64 běhy. Dvouúrovňový krácený faktoriální pokus se ukázal velmi efektivní při této citlivostní analýze.

2.2.3 Citlivostní analýza evakuačních modelů

V této kapitole jsou na konkrétních výzkumech ukázány možnosti a přínosy, které nabízí užití citlivostní analýzy v oblasti modelování toku a evakuace osob.

Studie za pomoci citlivostní analýzy mohou poskytnout například první kroky v kalibraci a validaci modelu, jako uvedla Duives a kol. [14]. Tento článek poskytuje komplexní citlivostní analýzu parametrů modelu kontinua navrženého Hoogendoornem a kol. [15]. Je zde studována schopnost makroskopického modelu předpovídat pohyb davu. Pomocí čtyř případových studií byla testována citlivost predikce modelu s ohledem na parametry, které řídí simulaci chování při chůzi. Na základě výsledků se dospělo k závěru, že začlenění lokálního chování volby trasy a vyvážení schopností chodců s ohledem na vlastní třídu a jiné třídy jsou nezbytné pro správnou predikci dynamiky pohybu davu. V tomto modelu třída popisuje všechny chodce, kteří chodí ze stejného počátku do stejného cíle a mají stejné fyzické schopnosti. Citlivostní analýza odhalila dále dvě chyby v současném modelu, a to že není schopna simulovat anticipace a zónu s nízkou hustotou za rohem. Tyto problémy mohou být díky tomu v budoucnu zmírněny.

Citlivostní analýza je také prováděna na parametry nových evakuačních modelů [16]. V článku je představen nový mikroskopický evakuační model na principu buněk pro simulaci evakuace v místnosti se čtyřmi východy. Modifikace spočívala především ve zlepšení statického podlahového pole, čehož bylo dosaženo tím, že se vzaly v úvahu kapacita výstupní šířky a stupně přetížení v blízkosti východů. Výsledky simulace ukázaly, že doba evakuace je citlivá na tři kognitivní koeficienty parametrů modelu.

Zajímavou ukázkou citlivostní analýzy v oblasti evakuace je studie zabývající se modelem spolehlivosti bezpečné evakuace osob z veřejných shromažďovacích prostorů [17]. Případová studie se týká prostoru nákupního střediska a evakuační čas je zde stanoven ručním výpočtem. Byly zde analyzovány jak koeficienty citlivosti, tak citlivostní parametry.

Dalším příspěvkem v této oblasti, který stojí za zmínku je článek zabývající se optimalizací požární bezpečnosti pomocí kritérií přijatelnosti [18]. Je zde provedena citlivostní analýza času ASET a RSET. Měřítka citlivosti se zde používají k odhalení vlivu nejistoty ohledně odhadu rizika. Tento přístup je použit například pro optimalizaci minimální požadované šířky dveří pro maloobchodní budovy. Zjištěnými významnými parametry jsou rychlost rozhořívání a hustota osob. Důkladným stanovením těchto parametrů se může významně snížit přidružené zkrácení při posuzování rizik.

2.2.4 Závěr

Oproti jiným odvětvím v požární bezpečnosti je citlivostní analýza evakuačních modelů vlaků celkem opomíjená. Přitom v omezeném prostoru např. vlaku, ve kterém mohou být ztížené podmínky evakuace, kde se mohou vyskytovat různě pohybově omezení lidé a vlak se může nacházet v různě složitém prostředí je velké množství vstupních parametrů a nejistot. Aplikace citlivostní analýzy v této oblasti tedy má význam a může přinést zajímavé poznatky.

2.3 Matematické modelování evakuace z vlaků

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, matematické modelování evakuace z vlaků je stále užitečnější nástroj k určení celkového evakuačního času a dat k pochopení dynamiky evakuace. V současné době existuje nespočet možností, jak evakuaci ve vlacích provést. V této kapitole jsou představeny základní druhy počítačových modelů, uvedeny možné vstupní parametry a parametry získané z experimentů a shrnuty již provedené počítačové simulace evakuace. Celkový přehled této problematiky uvedla ve své zprávě Federální správa železnic (FRA) v USA [19].

2.3.1 Počítačové evakuační modely

Pokročilé počítačové evakuační modely lze rozdělit z hlediska základního principu, který definuje pohyb osob do dvou hlavních kategorií: hydraulické modely a modely individuálního pohybu osob [19].

2.3.1.1 Hydraulické počítačové modely

Hydraulické počítačové modely používají stejné principy jako ruční hydraulické výpočty a reprezentují evakuovanou skupinu globálně. Při použití takového globálního způsobu mají obvykle osoby jednotné charakteristiky, jako je velikost a rychlost pohybu. Hydraulické modely nepředstavují jednotlivce, ale místo toho předpokládají, že pohyb může být reprezentován tokem osob, rychlostí v závislosti na hustotě a vztahem mezi hustotou a tokem. Některé z těchto modelů umožňují uživateli určit procentní podíly skupin osob, které mají různé vlastnosti. Každému typu skupiny je pak přiřazena vlastní sada vlastností, která ovlivňuje evakuaci této skupiny.

Kapitola v příručce SFPE Handbook [20] uvádí, že hydraulický model je limitován faktory, které mohou představovat, například:

- Chování, které zhoršují pohyb, nejsou brány v úvahu.
- Počet lidí jako základní komponent je důležitější, než jejich totožnost a individuální znaky.
- Je uvažován spíše pohyb mezi jednotlivými výstupními komponenty (jako například z místnosti do místnosti), než pohyb uvnitř místností.
- Výsledky jsou deterministické, a proto zůstanou stejné, pokud nebudou provedeny změny ve scénáři nebo použitých předpokladech.

2.3.1.2 Modely individuálního pohybu

Modely individuálního pohybu se pokouší simulovat chování osob, jejich vyhodnocování situace a rozhodování, na základě jejich předepsaných vlastností a faktorech, které je ovlivňují. Rozhodování je většinou ovlivněno interakcí mezi jednotlivými osobami, podmínkami nebo událostmi, které se vyskytly během konkrétního scénáře a algoritmickými pravidly zabudovanými v modelu. Sofistikovanost a rozsah reprezentace této interakce se liší mezi modely.

Mnoho z těchto modelů dává uživateli možnost volit vlastnosti pro každou osobu nebo skupinu osob z hlediska druhu skupiny. Například proměnné faktory jako maximální rychlost chůze, věk, pohlaví, motivace a znalost prostředí mohou ovlivnit chování každého konkrétního jednotlivce a tím i skupiny. Tyto proměnné faktory mohou být objasněny ve vztahu vlivu individuální agility na evakuační čas. Předpovědi evakuačního času mohou být použity pro specifické evakuační scénáře jako je např. výstup za použití pouze jedné dveří na úroveň kolejí nebo na nízké nástupiště za nouzového osvětlení. Spolehlivost předpovědi evakuačního času je závislá na vhodnosti pozorovaných údajů skutečného pohybu osob. Možnosti modelu mohou také usnadnit zahrnutí některých výjimečných aspektů scénářů evakuace z osobních kolejových vozidel.

Modely individuálního pohybu vypočítávají rychlost pohybu odlišně od hydraulických modelů. Namísto globální rychlosti řízené hustotou má každá osoba svoji vlastní maximální rychlost. Pokud nejsou žádné obtíže (např. zranění), agenti se budou pohybovat touto rychlostí, dokud nenarazí na překážku, jako je třeba pomaleji se pohybující osoba. V případě, kdy není prostor dostatečně široký sníží se v tomto okamžiku rychlost osoby, která se pohybuje rychleji.

2.3.2 Vstupní data pro výpočet evakuačního času z vlaků

Jak již bylo zmíněno výše, vstupní data jsou důležitou součástí modelování. V roce 2013 vydala Federální správa železnic (FRA) v USA zprávu o výzkumném programu zabývající se evakuací a modelováním evakuace v osobních vlacích [19]. V této zprávě se mimo jiné uvádí i potenciální vstupní data pro evakuační modely. Seznam těchto potenciálních vstupních dat je uveden v tab. 1. Autoři je zjišťovali z analýzy zkoumaných počítačových evakuačních modelů.

Specifické vstupy, které požaduje jakýkoliv evakuační model, závisí na metodě výpočtu a informacích o zkoumaném evakuačním scénáři. Většina modelů používá z tohoto seznamu pouze podmnožiny vstupů, protože pouze jen ty nejkompexnější modely pohybu jednotlivých osob mohou zahrnovat všechny variabilní faktory. Některá vstupní data budou mít významnější dopad na celkový čas evakuace než jiná. Relativní význam proměnlivých faktorů musí být stanoven pomocí evakuačních pokusů, jejichž výsledky by mohly snížit počet položek v tomto seznamu.

tab. 1 Potenciální vstupní data pro výpočet výstupu z osobního vlaku; převzato a upraveno z [19]

kategorie	vstupní data
typ železničního vozu a geometrie	jednopodlažní nebo vícepodlažní
	rozměry interiéru vozu
	uspořádání sedadel
	šířka a výška uličky/cesty výstupu
	umístění schodiště, šířka, výška, výška a délka stupně
	překážky – velikost a umístění

kategorie	vstupní data
cestující	počet cestujících
	umístění cestujících v železničním voze těsně před výstupem
provozní prostředí	šířka a výška provozního prostředí výstupní cesty
	viditelnost a požární podmínky mimo železniční vůz
typ výstupu	umístění a velikost dveří
	umístění a velikost únikových oken
	umístění a velikost ostatních nouzových výstupů
dostupnost východů	otevřené, zavřené a je třeba je ručně otevřít, nebo zablokované
	čas potřebný k manuálnímu otevření
	směr otevírání vzhledem k výstupu
podmínky požáru	viditelnost
	teplota zplodin
	toxicita zplodin
nouzová signalizace	umístění a velikost znaků
	fotoluminiscenční nebo reflexní
osvětlení	úroveň osvětlení
	doba trvání osvětlení
vlastnosti cestujících	pohlaví
	věk
	pohyblivost (pohyblivý, postižení, zranění), schopnost dosáhnout výstupu
	čas pohybu skrz uličky, dveře, okna
	doba váhání u východu
rozhodování	doba před pohybem (detekce, frekvence falešného poplachu, oznámení)
	ochota pomoci, odpovědnost
	sociální příslušnost
	angažovanost
	znalost
	ostražitost a omezení
	trpělivost / konkurenceschopnost
postup posádky	trénink
	slovní pokyny – veřejný rozhlasový systém
	fyzická pomoc
akce v případě nouzových situací	počet záchranářů
	trénink
	velikost a typ výstroje pro nouzový zásah
	fyzická pomoc (pomoc při výstupu z východů, otevření/odblokování východů, žebřík k oknu, řezání karoserie)

2.3.2.1 Vstupní data pro hydraulické modely

Hydraulické modely vyžadují zjednodušené vstupní údaje geometrie osobních železničních vozů a globální charakteristiky cestujících. Většina z těchto modelů představuje populaci v obecném smyslu. Některé z přezkoumaných modelů v článku [19] však mohou definovat více podskupin cestujících, takže je možné vzít v úvahu důležité charakteristiky cestujících. Například definovat podskupinu cestujících založených na mobilitě nebo věku, ty mohou představovat reprezentativnější výsledky skupiny cestujících jako celku.

Seznam proměnných vstupů použitelných pro hydraulické modely je uveden v tab. 2. Jak bylo dříve uvedeno, hydraulické modely obvykle nezahrnují rozhodování cestujících ani nepočítají s všeobecnou pomocí ze strany vlakového personálu nebo jejich reakce na mimořádné události, nicméně tyto modely mohou zahrnovat některé konkrétní kroky posádky a reakce na mimořádné události, jako je například pomoc při výstupu nebo otevření východů. Například dveře mohou být nepřístupné, dokud se neotevrou a budou tak použitelné jen pro část doby evakuace. Taková situace by byla začleněna do modelů jako zvýšení průtoku skrz výstup pouze v pozdější fázi evakuace, pomocí měnicích se vstupů definovaných uživatelem.

2.3.2.2 Vstupní data pro modely individuálního pohybu

Modely individuálního pohybu umožňují větší flexibilitu při definování geometrie kolejových vozidel a vlastností cestujících a vyžadují více datových vstupů než hydraulické modely. Tyto modely mohou zahrnovat podrobné detaily geometrie osobních železničních vozů a vlastností cestujících a teoreticky by mohly využít všechny vstupní proměnné uvedené v tab. 2. Některé modely definují charakteristiky cestujících stochastickým způsobem na základě omezených vstupních dat, nebo umožňují uživateli definovat vlastnosti každého jednotlivého cestujícího.

tab. 2 Potenciální vstupní data pro hydraulické modely a modely s individuálním pohybem; převzato a upraveno z [19]

kategorie	vstupní data
typ železničního vozu a geometrie	jednopodlažní nebo vícepodlažní
	rozměry interiéru vozu
	uspořádání sedadel
	šířka a výška uličky/cesty výstupu
	umístění schodiště, šířka, výška, výška a délka stupně
	překážky – velikost a umístění
poloha železničního vozu	vzpřímená nebo na boku
provozní prostředí	pokles od výstupu z železničního vozu k okolí
	šířka a výška provozního prostředí výstupní cesty
	viditelnost a požární podmínky mimo železniční vůz
typ výstupu	umístění a velikost dveří
	umístění a velikost únikových oken
	umístění a velikost ostatních nouzových výstupů

kategorie	vstupní data
dostupnost východů	otevřené, zavřené a je třeba je ručně otevřít, nebo zablokované
	čas potřebný k manuálnímu otevření
	směr otevírání vzhledem k výstupu
podmínky požáru	některé hydraulické modely zahrnují možnost vstupních dat z externích požárních modelů
osvětlení	základní a úroveň osvětlení výstupů
cestující	počet cestujících
	umístění cestujících v železničním voze těsně před výstupem
vlastnosti cestujících	pohlaví
	věk
	pohyblivost (pohyblivý, postižení, zranění)
	čas pohybu skrz uličky, dveře, okna (zahrnující dobu váhání)
postup posádky	fyzická pomoc
akce v případě nouzových situací	fyzická pomoc (pomoc při výstupu z východů, otevření/odblokování východů, žebřík k oknu, řezání karoserie)

2.3.3 Přehled uskutečněných matematických simulací evakuace z vlaku

Nový evakuační model EvacTrain 2.0 byl představen ve studii [21]. Tento stochastický model simuluje a zkoumá výsledky různých evakuačních strategií. V tomto článku je porovnáván s modelem STEPS a částečně validován evakuační zkouškou provedenou v roce 2009 Španělskou správou železnic. Porovnání výsledů EvacTrain 2.0 s evakuačním cvičením ukázalo, že software je schopen vytvářet přijatelné výsledky. Hlavní výhodou tohoto modelu je schopnost generovat a zpracovávat výsledky v řádech několika sekund. To je základní požadavek, aby bylo možné model používat jako podpůrný nástroj pro rozhodování v případě nouze. Uživatel modelu může okamžitě prozkoumat různé evakuační procesy změnou základních vstupních parametrů, to umožňuje zvolit nejlepší evakuační strategii v krátkém čase. Jako příklad je uvedena nouzová situace, kdy vznikne požár v jedoucím vlaku, zda co nejdříve zastavit a evakuovat vlak, anebo dojet k nejbližšímu nástupišti.

V článku [22] je uveden stochastický přístup pro simulaci lidského chování během evakuace z osobních vlaků. Simulace byla provedena v programu EvacTrain. Model byl vyvinut za účelem zachycení a zpracování stochastických odchylek v době evakuace pomocí metod Monte Carlo za účelem simulace náhodných charakteristik, rozhodnutí a činností cestujících. EvacTrain zohledňuje cestující, kteří se zastavují v uličce, nebo jsou zastaveni v uličce chováním jiných cestujících, což nelze simulovat současnými evakuačními modely, které jsou určeny především pro budovy. Model byl částečně validován dvěma evakuačními cvičeními a dále byly výsledky z EvacTrain porovnány s výsledky z programů STEPS, FDS + Evac a Pathfinder. Výsledné doby evakuace z programu EvacTrain byly delší oproti srovnávaným modelům. To je dáno závislostí doby evakuace na činnostech prováděných jednotlivými cestujícími, kteří narušují průběh

evakuace uličkou. Jedním ze závěrů je, že evakuační proces ve vlaku není jednoduchou záležitostí pohybu a při evakuační analýze je třeba uvažovat více faktorů chování.

Podobně jako evakuace z vlaků v tunelu je problematická i evakuace na mostních konstrukcích. Takovýto náročný typ evakuace může být daleko více ovlivněn heterogenitou evakuované skupiny jak upozorňuje článek [23]. Autoři studie se zde pokouší modelovat heterogenní skupinu, složenou podle populace v Dánsku. Pomocí modelu STEPS byly modelovány dva evakuační scénáře. První zahrnoval homogenní skupinu složenou z mladých, zdatných lidí a druhý heterogenní skupinu se zastoupením dětí, starších lidí a lidí s kognitivním, sluchovým nebo zrakovým postižením. Zastoupení jednotlivých skupin je patrné z tab. 3.

tab. 3 Zastoupení osob v jednotlivých scénářích (převzato a upraveno z [23])

Charakteristika osob	Scénář a počet osob	
	1	2
Zdatné osoby	46	23
Děti	-	8
S kognitivním postižením	-	2
Starší osoby	-	8
Se sluchovým postižením	-	3
Se zrakovým postižením	-	2

Z porovnání vyplynulo, že průměrná doba evakuace heterogenní skupiny byla o 40 % delší než homogenní skupiny složené ze zdatných lidí. Nálezem této studie tedy bylo, že celková doba evakuace se zvyšuje, pokud se jedná o heterogenní populaci. Studie byla limitována především nedostatkem reálných vstupních údajů o pohybu kognitivně, zrakově a sluchově omezených osob. Diskutabilní je v takto složitém evakuačním prostředí volba modelu STEPS, který je založen na principu buněk, kde v každé buňce mřížky se nachází pouze jedna osoba.

Matematická simulace evakuace vlaku byla uskutečněna i v rámci výzkumu zabývajícím se požární bezpečností meziměstských a mezinárodních vlaků uvedených v článku [24]. Ve studii jsou zjištěna hlavní požární nebezpečí, následně odhadnuty důsledky pro různé požáry ve vlaku pomocí simulací a ručních výpočtů. Do výzkumu jsou zahrnuty i požárně bezpečnostní zařízení jako jsou samouzavírací dveře a vodní mlha. Součástí výzkumu jsou i experimenty a také jsou zde částečně probrány problémy týkající se obrácených železničních vozidel. Aby však bylo možné odhadnout důsledky pro cestující a zaměstnance na palubě zkoumaného železničního vozu v případě požáru, bylo nutné provést evakuační studii. V evakuační studii byly použity ruční výpočty a trojrozměrný model individuálního pohybu program Simulex, který dokáže simulovat únik a pohyb lidí z velkých a složitých prostorů. Použitý program se ukázal jako nevhodný při simulaci výstupu na úroveň kolejí při převýšení přibližně 1,3 m, a proto byly provedeny ruční výpočty, které výsledky doplňují. Při evakuaci po rovině například na nástupiště nebo do jiného vozu lze výsledky považovat za poměrně přesné.

Za zmínku stojí i simulační projekt, za nímž stojí F. Klügl a kol., který vyhodnocoval evakuaci osob z vlaku TGV v tunelu [25]. Pro tuto specifickou simulaci byl vyvinut model evakuace individuálního pohybu, který je aplikován na konkrétní scénář, kdy jsou vlaky zastaveny v tunelu kvůli požáru. Bylo simulováno osm odlišných scénářů. Zkoumány byly vzdálenosti mezi nouzovými tunely, šířka evakuační platformy v tunelu, šířka výstupních dveří vlaku a šířka samotného nouzového tunelu. Agenti byly reprezentováni kruhem o průměru 40 cm a přiřazeni k jedné ze tří různých věkových tříd, která určovala jejich individuální rychlost pohybu. Ověření výsledků těchto simulačních běhů bylo provedeno pouze odborníky, neboť nebyl proveden žádný odpovídající evakuační experiment. V současné době se dále pracuje na tomto modelu evakuace individuálního pohybu a v budoucnu bude také provedena citlivostní analýza.

Mezi nejvíce pokročilé matematické simulace evakuace z železničních vozidel se řadí program railEXODUS. Program představil E.R. Galea a kol. [26] společně s jeho některými softwarovými schopnostmi validovanými pomocí experimentálních dat. V rámci vývoje byla provedena rozsáhlá revize vlakových nehod a evakuací železničních vozů. Analýza 70 osobních železničních vozidel v letech 1999 až 2007 ukázala, že existuje při evakuaci řada situací, které ovlivňují chování a pohyb osob, které musí být v modelu zastoupeny. Údaje o nehodách byly užitečné při identifikaci aspektů lidského chování, které bylo třeba zahrnout do evakuačních modelů, neposkytly však možnost kvantifikovat výkon člověka v nouzových situacích. K dosažení tohoto cíle bylo nezbytné analyzovat údaje z řady evakuačních experimentů, které byly také použity jako součást kalibrace a validace modelu. Model railEXODUS má schopnost simulovat výstup z víceúrovňových železničních vozů nízkopodlažních i vysokopodlažních, výstupů s výškovým převýšením na terén v úrovni kolejiště a evakuací do sousedního vozu. V modelu je také možné simulovat evakuaci z převráceného vozu a vliv požáru na chování a výkon evakuovaných osob. Tento software byl dále vyvíjen v rámci výzkumného programu sponzorovaného FRA a US DOT pro použití na osobní vlaky v USA [27]. Nový prototyp je založen na úpravách existujícího softwaru railEXODUS a veškeré údaje o pohybech a chování agentů v rámci nového softwaru jsou odvozeny z analýzy železničních vozů US Passenger, které zahrnují experimentální zkoušky prováděné v letech 2005 a 2006. Experimentální zkoušky za nekonkurenčních podmínek zahrnovaly evakuaci z osobních vlaků nástupními dveřmi na nástupiště při normálním a nouzovém osvětlení a evakuaci s výškovým převýšením na terén v úrovni kolejiště za běžného osvětlení.

2.3.4 Závěr

Z výše uvedené literární rešerše vyplývá, že existuje velké množství parametrů, které mohou být uvažovány jako vstupy do modelů evakuace vlaku, ale získávání relevantních dat těchto vstupních parametrů může být obtížné. Nabízí se sice možnost převzít vstupní parametry, které vycházejí z evakuace budov, ale například šířky chodeb v budovách jsou mnohem větší než šířky uliček ve vlacích a výška stupně schodů je nižší než u schůdků na nástupiště či terén po stranách vozu. Proto evakuační toky osob, které vycházejí z evakuace budov nemohou odrážet skutečné evakuační podmínky v osobních kolejových vozidlech.

V dnešní době začínají vznikat speciální evakuační modely určené pro simulaci evakuace z vlakových vozů, většina z nich je však stále ve vývoji, ale pro simulaci evakuace z vlakového vozu lze také použít i evakuační modely primárně navržené pro budovy. Důležitá je však vhodná volba nastavení modelu a odpovídajících vstupních parametrů. Důvodem je specifický průběh evakuace z vlakových vozů ovlivněného velkou hustotou osob, stísněnými evakuačními koridory a členitou geometrií. Při vytváření těchto specifických simulací je nezbytná validace modelu evakuace pro takovou situaci, aby bylo umožněno získání co nejpřesnějších výsledků.

3 Citlivostní analýza modelu evakuace

Praktická část této diplomové práce se snaží odhalit význam vstupních parametrů modelu evakuace vlakového vozu vytvořeného v evakuačním programu Pathfinder. Zkoumán je vliv geometrických parametrů vlakového vozu a parametry cestujících na celkový čas evakuace. Z literární rešerše provedené v rámci této diplomové práce uvedené v části 2.3 vyplývá, že většina uskutečněných evakuačních simulací a evakuačních experimentů často zahrnuje pouze zdatné osoby. V běžném životě však vlaky cestují osoby různé zdatnosti a všech věkových kategorií, jak potvrzuje i výzkum uvedený v související diplomové práci [1]. Na tento často opomíjený faktor se v kombinaci s ostatními vstupními parametry snaží praktická část této diplomové práce zaměřit. V rámci výzkumu bylo realizováno několik kroků, které odpovídají hlavním částem této kapitoly. Úvodem jsou v části 3.1 představeny základní informace o modelové situaci, její předpoklady a cíle. V části 3.2 je pak popsán uskutečněný evakuační experiment z hlediska informací potřebných k vytvoření modelu evakuace. Vytvoření samotného modelu evakuace v programu Pathfinder je uvedeno v části 3.3, včetně popisu modelu, vstupních parametrů, výsledků a validace modelu evakuace. V dalším kroku, v části 3.4, jsou získaná data jak z matematické simulace, tak i z evakuačního experimentu podkladem pro citlivostní analýzu vstupních parametrů v závislosti na celkovém evakuačním čase. Citlivostní analýza zkoumaného modelu evakuace je v části 3.5 dále zpřesněna rozšířením o další evakuační scénáře. V části 3.6 jsou následně zkoumány další vstupní parametry nad rámec validovaného modelu evakuace, které nebylo možné z časových, finančních nebo organizačně náročných důvodů uskutečnit. Poslední část 3.7 obsahuje shrnutí a diskuzi dané problematiky.

3.1 Modelová situace – evakuace z vlaku CityElefant

Jedním z cílů požární bezpečnosti osobních železničních vozidel je včasná evakuace osob z vozidla, která je v rozměrově omezeném prostoru vlaku ovlivněna velkým množstvím parametrů. Ačkoliv některé teoretické studie evakuace osobních vlaků jako např. [23] a [26] byly založeny na skutečných dobách evakuace z osobních vlaků, většina teoretických evakuačních studií se spoléhá na odhady průtoků cestujících z budov [19]. V souladu s tím je k dispozici omezený počet vědecky navržených experimentů uvažující parametry osob při evakuaci vlaku. Chování a pohybové charakteristiky osob mohou mít v prostředí oproti běžným podmínkám v budovách významný vliv na celkovou dobu evakuace. Záměrem je tedy provést studii evakuace v souladu s pravidly jaké doporučují Marcos a Pollard [19], která bude zkoumat vliv geometrických parametrů v závislosti na parametrech osob. Tato studie evakuace, v rámci které byl uskutečněn evakuační experiment nouzového výstupu z vozidla příměstské dvoupodlažní elektrické jednotky typu EPJ471, známé častěji pod komerčním jménem CityElefant, zahrnuje vytvoření modelu evakuace v programu Pathfinder, jeho validaci a citlivostní analýzu modelu evakuace. Zkoumaný typ vlakové jednotky, kterou je konkrétně vložený vůz řady 071 jednotky EPJ471 CityElefant, dále jen „vložený vůz“, byl vybrán pro svůj kapacitní nástupní prostor

v úrovni nástupiště v kombinaci s křížením dvou proudů osob z dolního a horního podlaží. Dvoupodlažní jednotka CityElefant nabízí velké množství geometrických parametrů, které lze dále zkoumat. Evakuace z osobního železničního vozu může probíhat v různém prostředí a tím pádem i s rozdílnými typy výstupů. Pokud budeme uvažovat situaci, při které železniční vozidlo v případě požáru nezastaví v tunelu, nebo na mostní konstrukci podobně jako uvažovali Kindler, Sørensen a Dederichs [23], zbývají tři možné typy výstupů, které mohou u vlakové jednotky s hlavním podlažím v úrovni nástupiště (nizkopodlažní jednotky) nastat. V současné době vznikají evakuační modely jako například EvacTrain [21], které mohou sloužit k rozhodování o nejlepší evakuační strategii, tedy zda v případě požáru co nejdříve zastavit a evakuovat vlak, anebo dojet k nejbližšímu nástupišti. V případě zastavení co nejdříve po vypuknutí požáru se jedná o výstup na okolní terén, a to buď přímo na úroveň kolejiště, nebo pomocí nouzového schodiště, pokud je k dispozici. Další variantou může být situace kdy je vhodnější dojet k nejbližšímu nástupišti, pak evakuace probíhá bez výškového převýšení. Předmětem tohoto výzkumu je tedy především pomocí citlivostní analýzy odhalit vliv heterogenity skupiny osob na celkový evakuační čas u třech možných typů výstupů. Nadstavbou je odhalení vlivu šířky nástupního prostoru, který může být v případě nouzové evakuace omezen překážkou.

3.2 Evakuační experiment

Evakuační experiment se uskutečnil dne 13. 6. 2018 v areálu Depa kolejových vozidel Praha v Praze Michli. Na organizaci experimentu se podílela Fakulta stavební ČVUT v Praze a Výzkumný ústav kolejových vozidel a.s.. Samotný experiment probíhal v dopoledních hodinách od 9:30 do 13:30 a aktivně se ho zúčastnilo 90 dobrovolníků a 10 organizátorů. Simulována byla nouzová evakuace z vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 CityElefant, při mimořádné situaci. Všichni účastníci byli předem informováni o celém průběhu experimentu. Níže je evakuační experiment popsán pro potřeby matematického modelování evakuace z vlakového vozu a z hlediska vstupních parametrů pro citlivostní analýzu. Vyhodnocení a organizace experimentu je součástí související diplomové práce [1] a výsledky pro potřeby této diplomové práce jsou z ní převzaty.

Simulace nouzového výstupu začíná v době, kdy je vlaková souprava v klidu, po nouzovém zastavení a jsou již otevřeny hlavní dveře. Z hlediska polohy vlaku k okolnímu terénu je uvažováno se třemi variantami. První variantou je výstup ve výškové úrovni nástupiště. Druhou variantou je výstup pomocí schodů na úroveň okolního terénu s výškovým převýšením 750 mm. Třetí variantou je výstup přímo na úroveň okolního terénu s výškovým převýšením 750 mm. Současně jsou tyto nouzové výstupy simulovány s proměnou šířkou nástupního prostoru, a to v pěti variantách v rozmezí 650-1340 mm. Navíc jsou všechny výstupy z vozu provedeny se dvěma skupinami figurantů, a to s homogenní skupinou tvořenou zdatnými osobami ve věku kolem 18 až 38 let a heterogenní skupinou tvořenou jak zdatnými, tak i pohybově omezenými osobami ve věku od 0,5 do 80 let. Celkem vzniklo 30 základních evakuačních scénářů, které byly uskutečněny při experimentu a jsou v této diplomové práci matematicky modelovány.

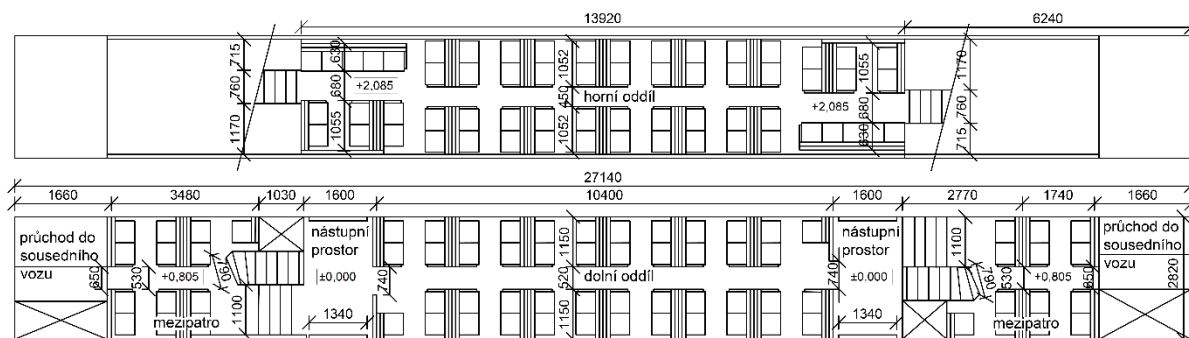
3.2.1 Parametry vozu

Nouzová evakuace probíhala pouze z vložené jednotky řady 071 třívozové jednotky EPJ471 CityElefant. Jednotka CityElefant, obr. 1, sloužící pro příměstské spoje je charakteristická dvěma oddíly pro cestující nad sebou. Kapacita vloženého vozu je 134 míst k sezení a 134 míst určených ke stání. Pro evakuační experiment byla uvažována pouze místa určená k sezení.



obr. 1 Třívozová elektrická jednotka řady 471 (CityElefant)

Vložený vůz má dva nástupní prostory s dvoukřídlými dveřmi po obou stranách vozu. Z důvodů bezpečnosti osob jsou však při nouzových výstupech využívány vždy pouze dveře na jedné straně vozu, konkrétně z možného ohrožení evakuovaných osob projíždějícími vlaky na opačné straně trati. Toto pravidlo bylo dodrženo i při simulaci nouzové evakuace. V nástupních prostorech se nachází vnitřní automatické, posuvné dveře šířky 740 mm (přičemž čistá průchozí šířka je 650 mm) oddělující přízemní podlaží s místy pro pasažéry a dále schodiště šířky 1000 mm vedoucí do mezipatra. Výškový rozdíl mezi podlahou dolního oddílu a mezipatra je 805 mm. Do horního patra s místy pro pasažéry vede schodiště šířky 760 mm a výškový rozdíl mezi podlahou mezipatra a horního oddílu je 1280 mm. Prostorové uspořádání vloženého vozu je patrné z obr. 2. Výškový rozdíl mezi úrovní podlahy vozu a temenem hlavy kolejnice je 550 mm. Podrobné informace o vlakové jednotce jsou uvedeny v diplomové práci [1].



obr. 2 Půdorys vložené jednotky řady 071 vozové jednotky EPJ471

3.2.2 Evakuační scénáře

Jedním z cílů evakuačního experimentu bylo získat data, díky kterým by se podařilo odhalit vliv několika předem vybraných parametrů při jejich vzájemném působení na celkovou dobu evakuace. Těmito parametry byly:

- heterogenita davu;
- šířka výstupu;
- typ výstupu.

Evakuační scénáře byly sestaveny tak, aby kombinovaly všechny tyto proměnné vstupní parametry. Při simulaci bylo navíc využito diagonální symetrie vložené jednotky, jak je patrné z obr. 2, díky které bylo možné při časově omezeném experimentu provést dvojnásobné množství nouzových výstupů. Celkem bylo provedeno 30 evakuačních scénářů, kdy se z jedné poloviny vozu evakuovala skupina s homogenním složením osob a současně z druhé skupina se složením heterogenním, každá skupina se tedy evakuovala pouze patnáctkrát. Pro minimalizaci vlivu „učení“ figurantů, a tak k negativnímu ovlivnění výsledků byly evakuační scénáře záměrně promíchány, jak je patrné z tab. 4.

tab. 4 Pořadí evakuačních scénářů – běhy a, b probíhaly současně, každý v jedné polovině vozu

skupina s homogenním složením osob													
šířka výstupu	na nástupiště				po schodech				na terén				
	číslo evakuačního scénáře a označení dveří												
650		4a						7b					14b
750				8a			3b						13a
900	1a								10b	11b			
1100					9a	2b						12a	
1340			5a					6b					15b
skupina s heterogenním složením osob													
šířka výstupu	na nástupiště				po schodech				na terén				
	číslo evakuačního scénáře a označení dveří												
650		3a						8b					13b
750				7a			4b						14a
900	2a								9b		12b		
1100					10a	1b					11a		
1340			6a					5b					15a

3.2.3 Specifikace figurantů

Evakuačního experimentu se zúčastnilo celkem 90 dobrovolníků všech věkových kategorií. Ve voze byla využita pouze místa určená k sezení a osoby byly rozmístěny po všech podlažích vloženého vozu. Figuranti byly rozděleni na dvě skupiny, a to na skupinu homogenní tvořenou mladými a zdatnými osobami a heterogenní tvořenou jak zdatnými, tak pohybově omezenými osobami všech věkových kategorií. Homogenní skupina (obr. 3 (a)) byla tvořena především studenty ČVUT v Praze a gymnázia, věkové rozmezí bylo 18 až 38 let. Heterogenní skupinu (obr. 3 (b)) tvořily osoby všech věkových kategorií, navíc i rodiče s dětmi, senioři a osoby se simulovaným omezením pohybu, věkové rozmezí figurantů bylo 0,5 až 80 let. Složení heterogenní skupiny bylo stanoveno na základě průzkumu provedenému v rámci diplomové práce [1] a stanoveným požadavkům se zdárně přiblížilo:

- děti ve věku 0-2 roky: 4 %
- děti ve věku 3-10 let: 10 %
- dospívající ve věku 11-20 let: 35 %
- dospělí ve věku 21-60 let: 43 %
- dospělí 60+: 8 %
- ZTP: pro simulaci byl jeden z dobrovolníků vybaven berlemi a vyzván k pomalejšímu pohybu, bez aktivního používání jedné nohy



(a)



(b)

obr. 3 Skupina figurantů se složením (a) heterogenním; (b) homogenním.

3.2.4 Specifikace šířky nástupního prostoru

Z již dříve uskutečněných citlivostních analýz, které jsou uvedeny například v kapitole 2.2.3 je možné vyzorovat velký vliv šířky koridoru, nebo dveří na průběh evakuace a celkový evakuační čas. Z tohoto důvodu nemohl být tento parametr opomenut při přípravě evakuačního experimentu. Z hlediska uspořádání interiéru vozu byla pro evakuační experiment zvolena jako nejvhodnější proměnná šířka nástupního prostoru, a to z důvodu, že v místě dochází ke slučování proudů z obou podlaží vozu a lze předpokládat největší hustotu osob. Pro odhalení trendu vlivu šířky nástupního prostoru s uvážením časového omezení experimentu bylo stanoveno pět šířek, a to: 1340, 1100, 900, 750 a 650 mm. Nástupní prostor byl omezován zábrany po celé výšce interiéru. Konstrukčně byly zábrany tvořeny na míru upravenými deskami na bázi dřeva, a to v několika rozměrových variantách. Připravené desky byly následně připevňovány k interiérovým rozpěrným tyčím umístěným v nástupním prostoru vozu (obr. 4). Zvolený typ zábran převyšující výšku ramen osob v kombinaci s rozpěrnými tyčemi vytvářel nejen optickou bariéru, ale také dostatečně pevnou konstrukci, vedle které byl možný bezpečný pohyb osob. Konstrukce byla stabilní a dostatečně tuhá, takže při průběhu evakuace nedocházelo k žádnému negativnímu ovlivnění figurantů.



obr. 4 Zábrana omezující nástupní prostor vložené jednotky na 750 mm

3.2.5 Specifikace výstupů

Posledním proměnným parametrem při evakuačním experimentu byl typ výstupu. V rámci této práce a evakuačního experimentu byly zkoumány pouze běžné varianty výstupu dveřmi, tzn. nezahrnující například evakuaci z havárií poškozeného nebo převráceného vozu. Zvoleny byly tři varianty, a to výstup:

- na nástupiště;
- po schodišti;
- na terén v úrovni kolejiště.

Výstup na nástupiště bez výškového převýšení byl při experimentu odehrávajícímu se v depu kolejových vozidel simulován pomocí mobilního pódia (obr. 5). Pódium bylo o rozměrech 3x3 m a bylo vybaveno schodištěm se zábradlím. Toto řešení bylo předem vymodelováno a odzkoušeno za pomoci matematického modelu v programu Pathfinder (více viz část 3.3) z hlediska toho, zdali v průběhu evakuace nedojde ke kumulaci osob na pódiu a k negativnímu ovlivnění rychlosti osob nacházejících se ve vlaku. Žádné zdržení na pódiu nebylo odhaleno a ke kumulaci osob nedocházelo. Navržený rozměr pódia (3x3 m) a přilehlé schodiště mohlo simulovat podmínky nástupiště.



obr. 5 Výstup z jednotky na pódium simulující nástupiště

Podobně byl řešen výstup na okolní terén pomocí schodiště (obr. 6 (a)), kde schodišťové stupně výšky 200 mm byly tvořeny pódiovými stupni hloubky 500 mm. Přímý výstup na terén v úrovni kolejiště byl bez pomůcek, jak je patrné z obr. 6 (b).



(a)



(b)

obr. 6 Výstup z jednotky (a) po schodišti; (b) na terén

3.2.6 Pokyny figurantům

Všichni figuranti byli informováni o průběhu experimentu a dostali pokyny o chování v průběhu evakuace. Jednotlivé evakuační běhy byly odstartovány hvizdem píšťalky. Jednalo se o nesoutěžní podmínky, základními body bylo:

- při usazování odložit příruční zavazadla, věci a bundy, přičemž je na uvážení každého z figurantů, zda osobní věci při evakuaci budou nosit nebo je nechají ve voze;
- bezprostředně po vyhlášení poplachu zahájit pohyb a spořádaně opustit vložený vůz;
- dbát na vlastní bezpečnost a případně pomáhat druhým;
- po opuštění vozu nebránit svým pohybem v okolí zatím neevakuovaným figurantům.

Průběh experimentu, sběr dat a metody měření jsou podrobně popsány v diplomové práci [1].

3.2.7 Shrnutí

Uskutečněný evakuační experiment byl organizovaný bez soutěžních podmínek se zastoupením všech věkových kategorií. Figuranti byly informováni o průběhu experimentu a jejich chování bylo předepsáno. V průběhu bylo realizováno několik evakuačních scénářů sestavených na základě měněných parametrů, kterými byly: heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Předpokladem byl velký vliv šířky nástupního prostoru hlavně v kombinaci s výstupem na terén u skupiny s heterogenním složením osob. Evakuační experiment byl úspěšný a získaná data jsou zpracována v rámci související diplomové práce [1]. Zpracované výsledky experimentu jsou uvedeny v části 3.3.5 a jsou použity pro validaci matematického modelu.

3.3 Matematické modelování evakuace osob z železničního vozidla

Matematické modelování evakuace je stejně jako jakýkoliv jiný nástroj sloužící k předpovědi za pomoci modelu omezeno nejistotami a vstupními parametry. V případě modelování evakuace v omezeném a geometricky složitým prostoru vlakového vozu může být vliv těchto omezení významný. Pro získání reálných výsledků z matematického modelu je tak důležitá správná volba vstupních parametrů a následná validace modelu. Získat vstupní data a validovat model evakuace bylo umožněno díky uskutečněnému evakuačnímu experimentu, který je popsán v části 3.2.

V této kapitole je popsáno provedení simulace několika modelových evakuačních scénářů ve vybraném výpočetním programu. Jsou zde uvedeny modelované evakuační scénáře, geometrické a polohové vstupní parametry, rozmístění a vlastnosti figurantů, a nakonec výsledky a validace modelu evakuace. Pro vytvoření modelu evakuace byl zvolen evakuační program Pathfinder, jehož použitelnost při simulaci evakuace z vlakového vozu již ověřil David Košťák, který se ve své diplomové práci [28] evakuačními modely zabývá.

3.3.1 Základní informace o evakuačním programu Pathfinder

Pathfinder je program sloužící k simulaci pohybu osob za pomoci agentů a skládá se ze tří modulů: grafické uživatelské rozhraní, simulátor a 3D prohlížeč výsledků [29]. K reprezentaci řešené geometrie prostoru využívá triangulární síť, čímž dokáže pracovat i s různými geometrickými tvary a křivkami. Tato triangulární síť zajišťuje kontinuální pohyb osob v celém prostoru a pohyb osob tak není omezován např. dělením prostoru na buňky. Pro modelování pohybu osob poskytuje Pathfinder dva režimy: režim SFPE a režim řízení (Steering model). Režim SFPE vychází ze studií uvedených v SFPE Handbook [30] a agenti mají defaultně zadané chování, tzn. že existuje závislost mezi rychlostí, hustotou osob a specifickým tokem osob. Steering model [31] je založen na nezávislém pohybu agentů ke svému cíli, kteří se zároveň vyhýbají ostatním agentům a překážkám v trase svého pohybu. Specifické toky nejsou explicitně zadány, ale vyplývají ze vzájemné interakce mezi agentem a prostředím, ve kterém se pohybuje.

Pro vytvoření modelu několika evakuačních scénářů byl použit program Pathfinder verze 2018, vyvíjený společností Thunderhead Engineering Colsultants, Inc., v rámci poskytnuté studentské licence. Informace o tomto evakuačním modelu jsou čerpány z uživatelského manuálu [29] a technické reference [32]. Program byl zvolen na základě dostupnosti, reprezentaci geometrie prostoru a velkému množství měnitelných vstupních parametrů v aktuální verzi softwaru.

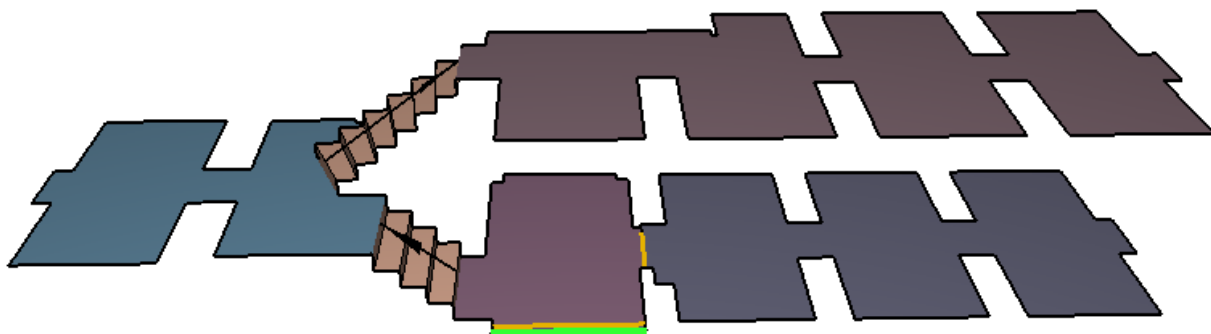
3.3.2 Modelové evakuační scénáře

Evakuační scénáře modelované v první fázi praktické části této diplomové práce, které jsou převzaty z evakuačního experimentu budou sloužit pro validaci modelu a následně budou také podrobeny citlivostní analýze vstupních parametrů. Jedná se celkem o 30 evakuačních scénářů, kde jsou vzájemně kombinovány měněné parametry, těmi jsou: heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Podrobnější specifikace těchto parametrů jsou uvedeny v části 3.2, stejně jako výpis všech scénářů. Níže je uveden popis těchto vstupních parametrů z hlediska integrace do modelu.

3.3.3 Geometrie modelovaného prostoru

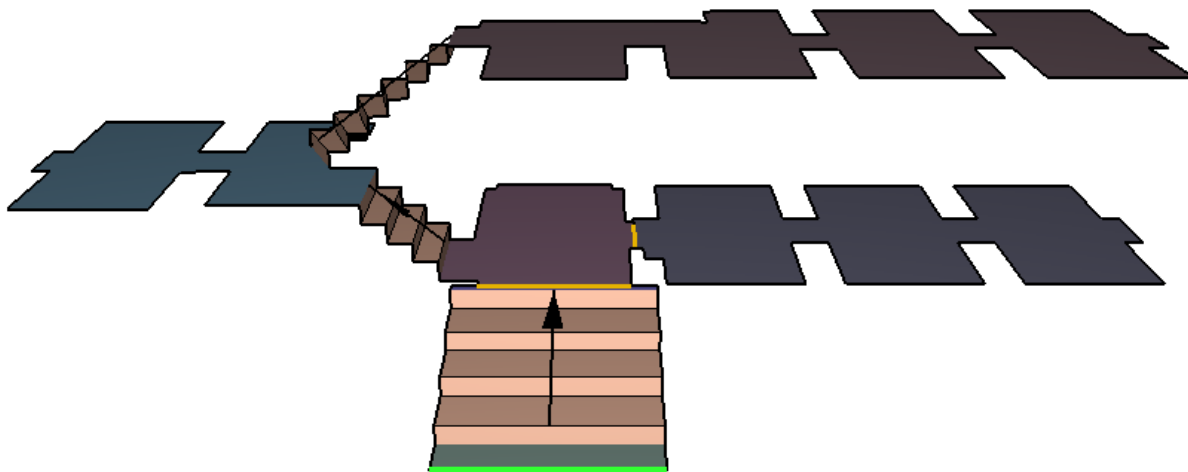
V rámci získání výsledků odpovídajícím uskutečněnému evakuačnímu experimentu, kde bylo využito diagonální symetrie vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471, jak je uvedeno v části 3.2, byl vytvořen odpovídající model poloviny vozu. Geometrie modelového prostoru byla převzata z rozměrů vozu CityElefant. Díky schopnosti programu Pathfinder importovat CAD soubor s rozměry evakuovaného vozu, bylo možné dodržet přesnou dispozici schodišť, únikových východů a vnitřního vybavení, jak je patrné z obr. 7, obr. 8 a obr. 9. Na základě poznatků uvedených v diplomové práci [28], kde byly modelovány dvě varianty znázornění sedadel a to bez, nebo s opěrkami, byly v interiéru vozu modelovány sedadla bez opěrek, neboť různé znázornění sedadel nehrálo při simulacích v programu Pathfinder zásadní roli.

Rozdílné varianty výstupu byly při experimentu vytvořeny pomocí mobilního pódia nebo schodiště. Pro simulaci výstupu v úrovni nástupiště bylo použito pódium o rozměrech 3x3 m se schodištěm na terén a celkový evakuační čas byl měřen v ose výstupních dveří. Toto řešení bylo předem vymodelováno a odzkoušeno v programu Pathfinder z hlediska toho, zdali nedochází ke kumulaci osob v prostoru výstupních dveří a tím i negativnímu ovlivnění celkové evakuace. Žádné zdržení tímto řešením nebylo odhaleno a bylo možné toto řešení považovat za vhodné, jak již bylo uvedeno v části 3.2.5. V matematickém modelu v programu Pathfinder byla tato varianta výstupu simulována východem, který umožňuje průchod pouze jedním směrem, jelikož je umístěn na okraji výpočetní sítě a odebírá osoby ze simulace. Celkový čas evakuace je shodně s evakuačním experimentem měřen ve výstupních dveřích vozu (obr. 7).



obr. 7 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – výstup na nástupiště

Obdobně byl řešen výstup z vozu pomocí schodiště na přilehlý terén. V matematickém modelu v programu Pathfinder je vytvořeno totožné schodiště jako bylo použito v případě experimentu a celkový čas evakuace je shodně měřen v ose dveří (obr. 8).

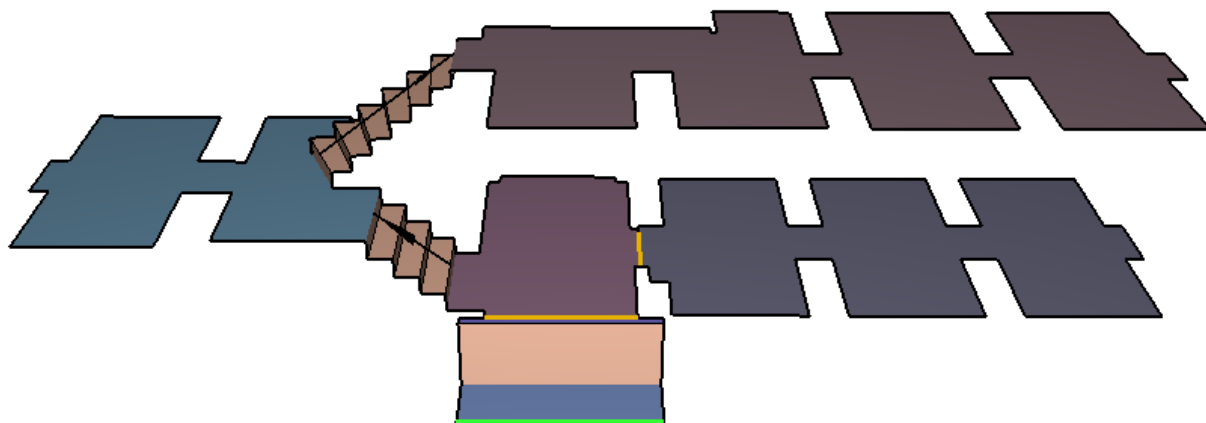


obr. 8 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – výstup po schodišti

Pro výstup na úroveň přilehlého terénu nebylo v případě evakuačního experimentu za potřebí žádných pomůcek. V matematickém modelu v programu Pathfinder je výškový rozdíl mezi výstupním prostorem a okolním terénem v úrovni nástupiště simulován schodem o výšce 0,75 m, celkový čas evakuace je shodně měřen v ose dveří (obr. 9). Vymodelovaný výškový rozdíl však sám o sobě nijak neomezuje rychlosti agentů jako to dělá prvek schodiště v programu Pathfinder a slouží především pro vizualizaci. Takovýto seskok z platformy totiž není možné v programu Pathfinder modelovat, proto je pohyb osob omezen jinak, a to:

- počtem maximálně dvou osob, které mohou současně seskočit (obě skupiny);
- zdržením v prostoru dveří před seskokem (pouze méně zdatné osoby v heterogenní skupině);
- zdržením po seskoku (pouze méně zdatné osoby v heterogenní skupině).

Počet osob, které mohou současně seskočit, byl určen na základě evakuačního experimentu kde bez výjimky nedocházelo k seskoku více než dvou osob. Dále bylo z evakuačního experimentu vyzorováno zdržení před seskokem a po seskoku na terén v úrovni kolejiště, a to u méně zdatných osob, dětí, seniorů a osob se simulovaným omezením pohybu. Zdatné osoby neměly se seskokem žádné výraznější potíže, a proto u homogenní skupiny nebylo třeba toto zdržení modelovat. Tato zdržení byla způsobená váháním, přípravou na seskok a vyrovnání rovnováhy po seskoku. Zdržení pro méně zdatné osoby v heterogenní skupině při seskoku jsou uvedena v části 3.3.4.2 (tab. 7).



obr. 9 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – výstup na terén v úrovni kolejiště

3.3.4 Parametry a umístění modelovaných agentů

Simulace byly prováděny ve výpočetním Steering módu a každému agentovi byl přidělen jeden východ. Rozmístění a chování jednotlivých figurantů vychází z experimentu. V souladu s evakuačním experimentem byla obsazena pouze jedna polovina vlakového vozu. Ve voze byla využita pouze místa určená k sezení a agenti byli rozmístěni po všech podlažích vloženého vozu. Pro všechny modelované scénáře je obsazení sedadel uvažováno shodné, rozmístění agentů po voze je patrné z obr. 10 a obr. 11. Do matematických modelů byly zadávány dva základní parametry definující figuranty, a to parametr rychlosti pohybu osob a šířka ramen. Získaná a vyhodnocená data z experimentu např. umístění, rozměry a rychlosti osob jsou převzaty z diplomové práce [1]. Počet a zastoupení agentů v jednotlivých skupinách je uveden v tab. 5.

tab. 5 Zastoupení osob v jednotlivých skupinách

Charakteristika osob	Skupina a počet osob	
	homogenní	heterogenní
Zdatné osoby	42	31
Děti	-	5
S dítětem v náručí	-	2
Senioři	-	3
Se simulovaným omezením pohybu	-	1

U obou evakuovaných skupin osob se nabízelo využít funkce programu Pathfinder a modelovat agenty v dílčích skupinách s vazby mezi sebou. Takový model by pak mohl přesně odpovídat uskutečněnému experimentu kde se dílčí skupiny osob vyskytovaly, a to například rodiče s dětmi. Nicméně čekání členů skupiny na zpožděného agenta v prostorově omezeném prostředí vlakového vozu častokrát evakuaci zcela zablokovalo. Bylo tak ověřeno, že funkce skupin programu Pathfinder může mít využití především ve velkých a rozsáhlých prostorech, ale pro modelování evakuace v omezeném prostoru není vhodná. Funkce simulace skupiny agentů s vazbami programu Pathfinder při modelování evakuace z vlakového vozu tedy nebyla použita.

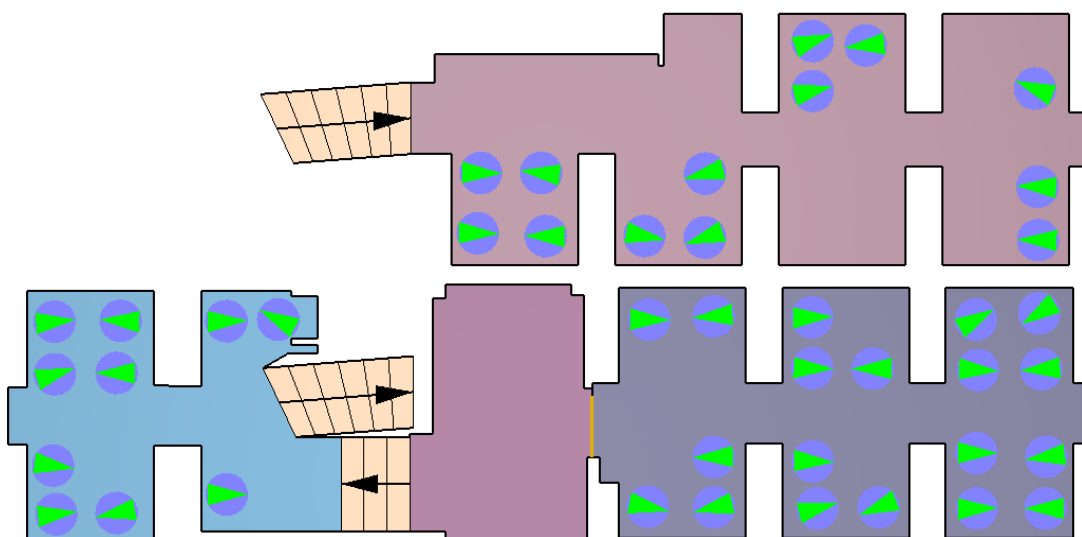
3.3.4.1 Homogenní skupina (zdatné osoby)

Homogenní skupina figurantů měla za úkol simulovat zdatné osoby všech pohlaví v produktivním věku. Pro všechny simulované agenty v homogenní skupině byla uvažována stejná šířka ramen 45,58 cm, která je defaultně nastavená v programu Pathfinder. Pro matematické modelování byly z evakuačního experimentu naměřeny rychlosti, přičemž v měřené skupině byly zastoupeny zdatné osoby ve věku od 19 do 53 let, hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.

tab. 6 Normálové rozdělení rychlostí zdatných osob ve věku od 19 do 53 let z evakuačního experimentu

Minimální hodnota:	0,64 m/s	Maximální hodnota:	1,56 m/s
Průměr:	0,95 m/s	Směrodatná odchylka:	0,25 m/s

Jedná se o experimentální výsledky popisující neomezenou rychlost osob pohybujících se v jedné řadě uličkou osobního železničního vozu. Vzhledem k tomu, že použitá data byla získána jako aktuální rychlosti osob s již zahrnutými vlivy okolních překážek a hustoty osob, musel být při jejich využití upraven i vztah mezi rychlostí pohybu osob a hustotou osob, který byl z původního nastavení (křivka SFPE) upraven na konstantní hodnotu rovnou 1,0. Rozmístění homogenní skupiny osob ve vloženém voze je patrné z obr. 10.



obr. 10 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – homogenní skupina osob

3.3.4.2 Heterogenní skupina (pohybově omezené i zdatné osoby)

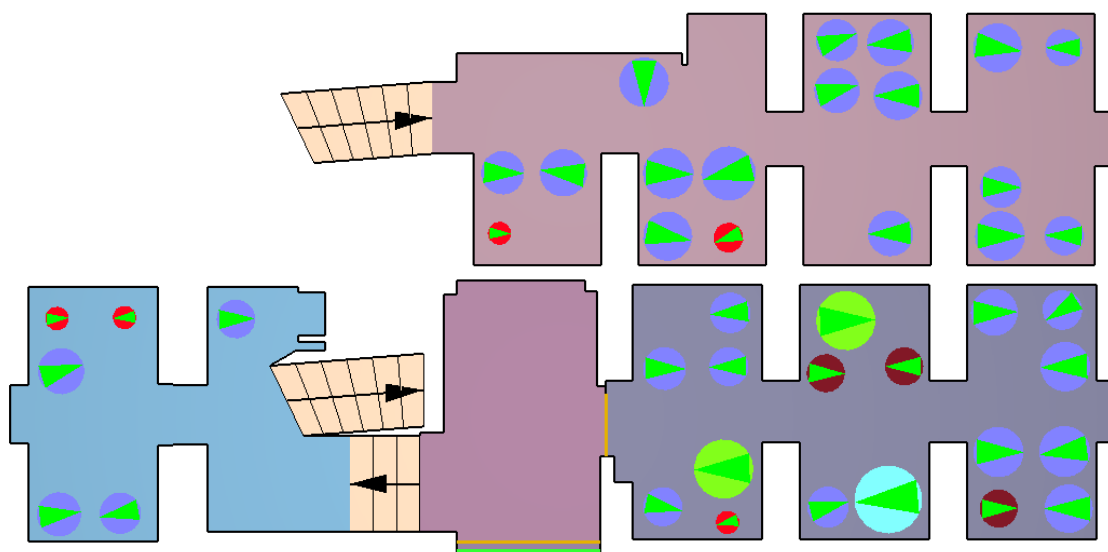
Heterogenní skupina figurantů měla za úkol simulovat jak zdatné, tak i pohybově omezené osoby všech věkových skupin. Pro matematické modelování byly osoby rozděleny do pěti skupin, a to děti, senioři, osoby s dítětem v náručí, osoby se simulovaným omezením pohybu a zdatné osoby. Rychlosti pohybově omezených osob (tab. 7) vycházejí jak z evakuačního experimentu, tak současně bylo přihlédnuto i k hodnotám uváděným v článku [23], kde je obdobně řešena simulace heterogenní skupiny. Rychlosti zdatných osob odpovídají naměřeným hodnotám při evakuačním experimentu. Šířky ramen agentů představující různé skupiny osob v heterogenní skupině byly získány z dotazníků figurantů, kteří se zúčastnili evakuačního experimentu.

Přehledný seznam a hodnoty všech zadávaných vlastností agentů heterogenní skupiny je uveden tab. 7, kde jsou uvedena i zdržení osob před seskokem a po seskoku při evakuaci na terén v úrovni kolejíště. Program Pathfinder totiž neumožňuje žádný typ omezení, který by charakterizoval pohybové omezení méně zdatných osob při překonávání výškového rozdílu, a přitom neovlivňoval pohyb osob po schodišti nebo po rovině, více viz část 3.3.6.3. Zdržení skupin osob jsou vyzorovaná z evakuačního experimentu.

tab. 7 Vstupní parametry agentů heterogenní skupiny

Charakteristika osob	Šířka ramen [cm]	Neomezená rychlost osob v uličce [m/s]	Zdržení před seskokem [s]	Zdržení po seskoku [s]
Zdatné osoby	min	38,0	dle tab. 5	-
	max	58,0		
	průměr	45,7		
	směr.odch	5,0		
Děti	25 a 32	0,84	2,5	0,5
S dítětem v náručí	62	0,65	1,5	0,5
Senioři	40	0,55	2,0	1,0
Se simulovaným omezením pohybu	71	0,55	1,5	0,75

Rozměry agentů představující osoby s dítětem v náručí nebo agenta představujícího osobu z evakuačního experimentu pohybující se s pomocí francouzských holí byly navrženy dle změřených rozměrů figurantů z evakuačního experimentu. U těchto agentů jsou v programu Pathfinder upraveny i základní nastavení redukce šířky pro řešení konfliktů mezi agenty ve frontě (z původní hodnoty koeficientu 0,7 na 0,6) a redukce šířky pro pohyb skrz úzkou geometrii na minimální rozměr 50 cm. Rozmístění heterogenní skupiny osob ve vloženém voze vychází z evakuačního experimentu a je patrné z obr. 11.



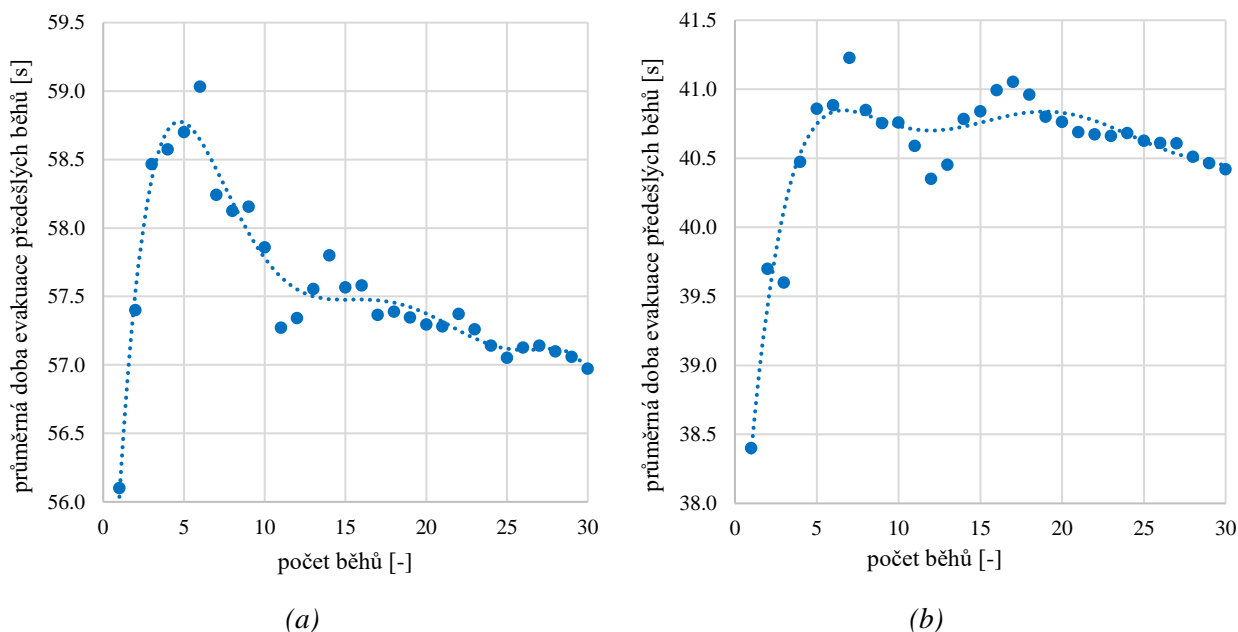
obr. 11 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – heterogenní skupina osob

3.3.5 Výstupy

Byl vytvořen specifický model evakuace v programu Pathfinder, přičemž cílem bylo jeho přiblížení k reálné situaci nouzové evakuace z vlakového vozu při různých situacích. Těmito okrajovými podmínkami byly tři měněné parametry:

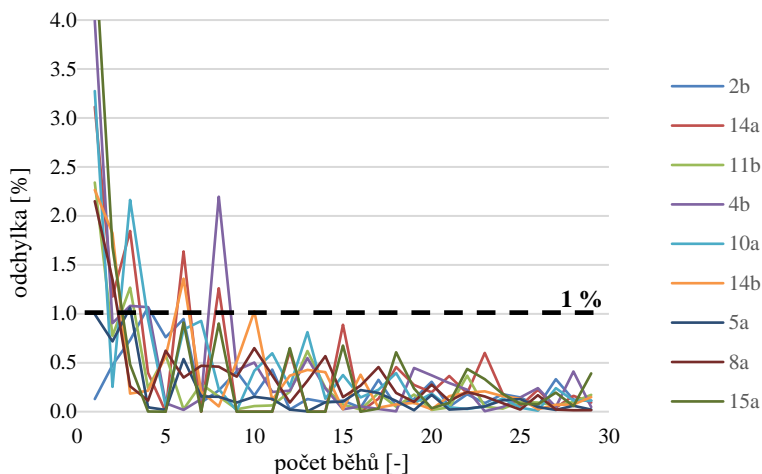
- heterogenita davu;
- typ výstupu;
- šířka výstupu.

Pro potřeby této diplomové práce nebylo cílem vytvořit plně stochastický model, který by zahrnoval rozptyl vstupních parametrů osob (rychlost pohybu, šířku ramen, chování agentů), a proto byly tyto charakteristiky agentů nastaveny v modelu evakuace konstantní. Přesto byla stochastičnost modelu evakuace programu Pathfinder zachována, a to v podobě náhodného rozhodování agentů. Tato vnitřní charakteristika agentů přednastavená programem Pathfinder je při spouštění simulací v příkazovém řádku v textovém zadání označena jako „rseed“ [32] a byla náhodně měněna. Z tohoto důvodu je nutné definovat příslušný počet běhů, které mají být simulovány, aby se zabránilo tomu, že výsledky modelů budou ovlivněny počtem simulací [33]. Počet běhů simulace jednotlivých evakuačních scénářů byl ověřen pomocí jednoduché studie konvergence [33], která byla aplikována na celkový evakuační čas, tedy 100 % evakuovaných osob. Metoda spočívá v analýze průměrných dob evakuace, která vzniká po sobě jdoucím počtem běhů. Kritériem přijatelnosti bylo zvoleno dosažení odchylky průměrné doby evakuace předešlých běhů méně než 1 %, tzn., že další běh změní výsledky o méně než 1 %.



obr. 12 Jednoduchá studie konvergence pro evakuaci: (a) homogenní skupiny osob na terén, při šířce výstupu 650 mm (b) heterogenní skupiny osob na nástupiště, při šířce výstupu 1100 mm

Na obr. 12 jsou pro ilustraci uvedeny dva grafy znázorňující jednoduchou studii konvergence, kdy průměrné hodnoty celkového evakuačního času v případě obr. 12 (a) konvergují k hodnotě 57,1 s, na obr. 12 (b) k hodnotě 40,6 s. Jak je patrné z průběhů odchylek několika vybraných evakuačních scénářů na obr. 13, tak k nárůstu odchylky průměrné doby evakuace předešlých běhů nad 1 % po uskutečnění deseti běhů již nedocházelo a při třiceti bězích byla odchylka nižší jak 0,5 %.



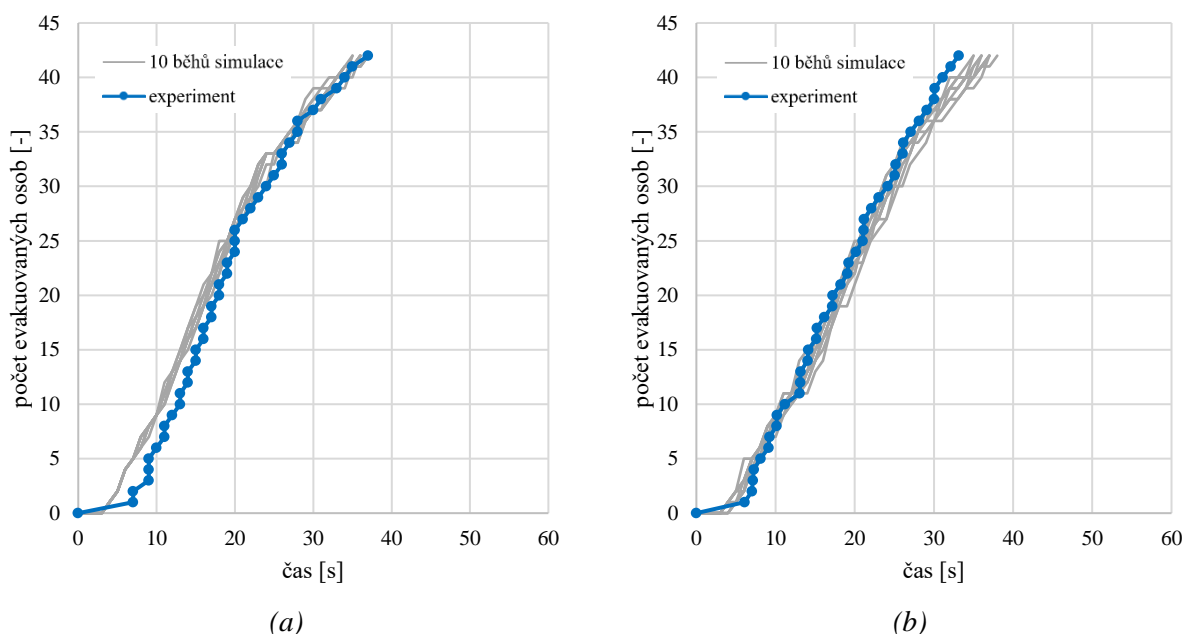
obr. 13 Průběhy odchylek průměrné doby evakuace předešlých běhů vybraných evakuačních scénářů

3.3.6 Výsledky a porovnání s experimentálními daty

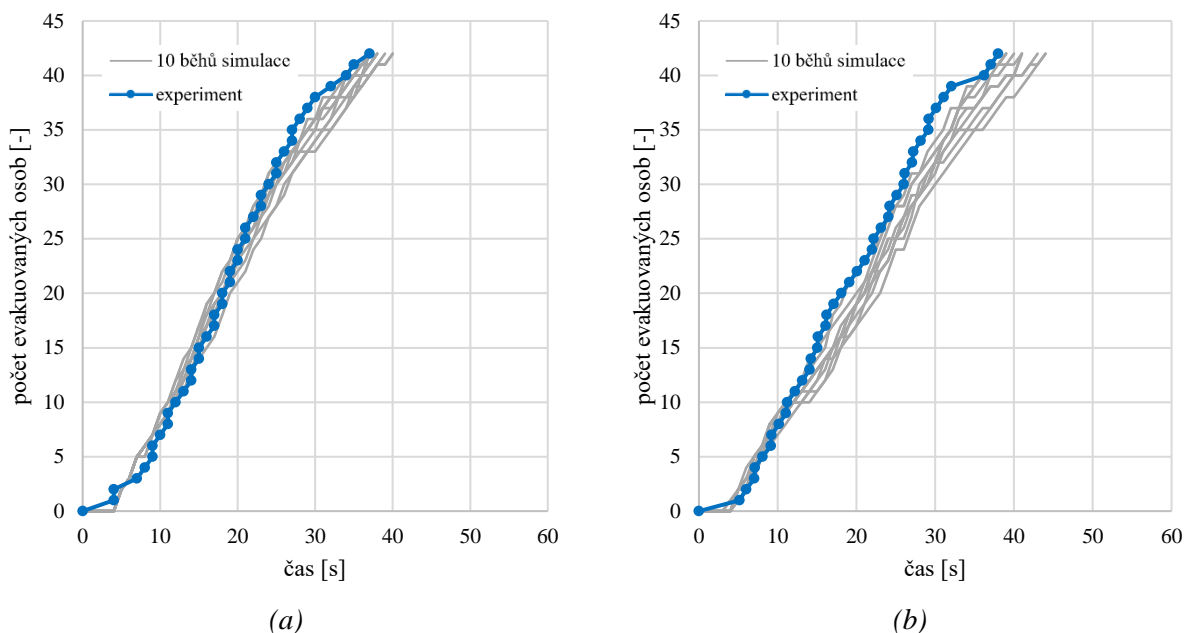
V této podkapitole jsou uvedeny a porovnány výsledky modelu evakuace s daty získanými z evakuačního experimentu. Porovnání dat slouží především k ověření správnosti výsledků matematické simulace a je podkladem validace modelu evakuace vlakového vozu programu Pathfinder. Modelováno a porováno bylo všech třicet evakuačních scénářů viz část 3.3.2. Níže jsou uvedeny grafy jednotlivých evakuačních scénářů, na kterých je vidět průběh evakuace osob. Šedou barvou jsou křivky závislosti evakuovaných osob na čase deseti běhů simulace matematického modelu, modrou barvou křivky představující data naměřené při evakuačním experimentu. Důvodem proč nejsou výsledky matematického modelu zprůměrovány a vyznačeny pouze jednou čarou je možné nepozorovatelné vychýlení průměrné hodnoty ojedinělým výsledkem jako by nejspíš nastalo v případě ojedinělého výsledku na obr. 22 (b). Dalším důvodem je i skutečnost, že jednotlivé evakuační scénáře nebyly při evakuačním experimentu opakovány tzn., že ani v jednom případě neproběhl evakuační scénář se stejným nastavením dvakrát. Z toho vyplývá, že není možné experimentální data mechanicky považovat za směrodatná a může se i v jejich případech jednat o ojedinělé hodnoty. Vykreslení více vypočtených hodnot do grafu tedy může tyto nejistoty do jisté míry eliminovat.

3.3.6.1 Evakuované osoby v čase – evakuace na nástupiště

Na obr. 14 až obr. 18 jsou uvedeny grafy znázorňující průběh evakuace homogenní a heterogenní skupiny osob na nástupiště při různých šířkách nástupního prostoru. Nastaveny byly vždy stejné okrajové podmínky pro homogenní a heterogenní skupinu osob.

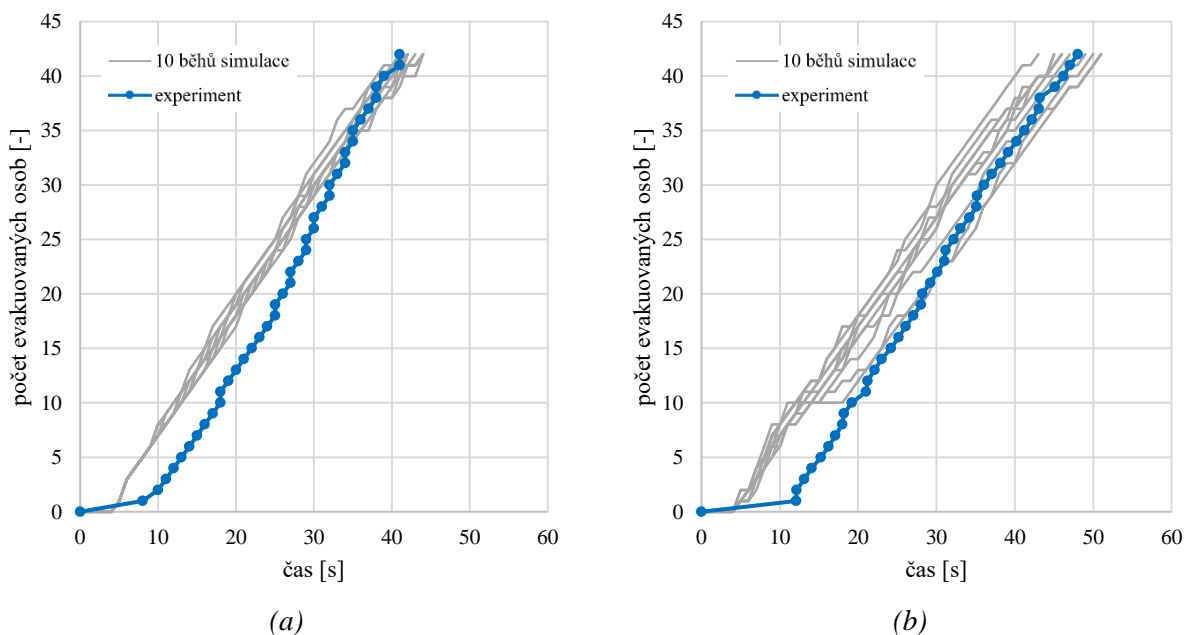


obr. 14 Výstup na nástupiště, šířka dveří 1340 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



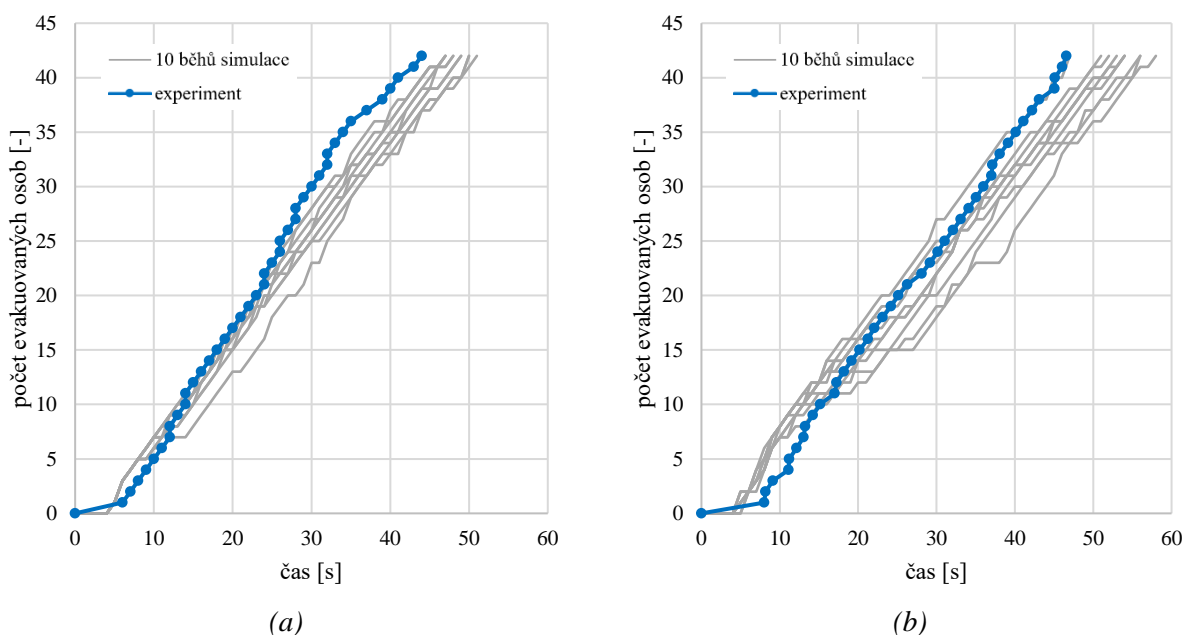
obr. 15 Výstup na nástupiště, šířka dveří 1100 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

V případě evakuace při plné šířce a šířce 1100 mm nástupního prostoru na nástupiště (obr. 14 a obr. 15) vychází výsledné evakuační časy z matematického modelu u homogenní a heterogenní skupiny osob téměř totožné. Tomu odpovídají i výsledky z evakuačního experimentu, kde při plné šířce nástupního prostoru byla heterogenní skupina zahrnující i pohybově omezené osoby rychlejší než homogenní skupina složená pouze z mladých a zdatných osob. Tento výsledek lze vysvětlit především nízkou motivací mladistvých účastníků v homogenní skupině a oproti tomu zodpovědností a snahou rodičů, dětí a seniorů podat nejlepší výkon při simulaci evakuace ve skupině heterogenní.

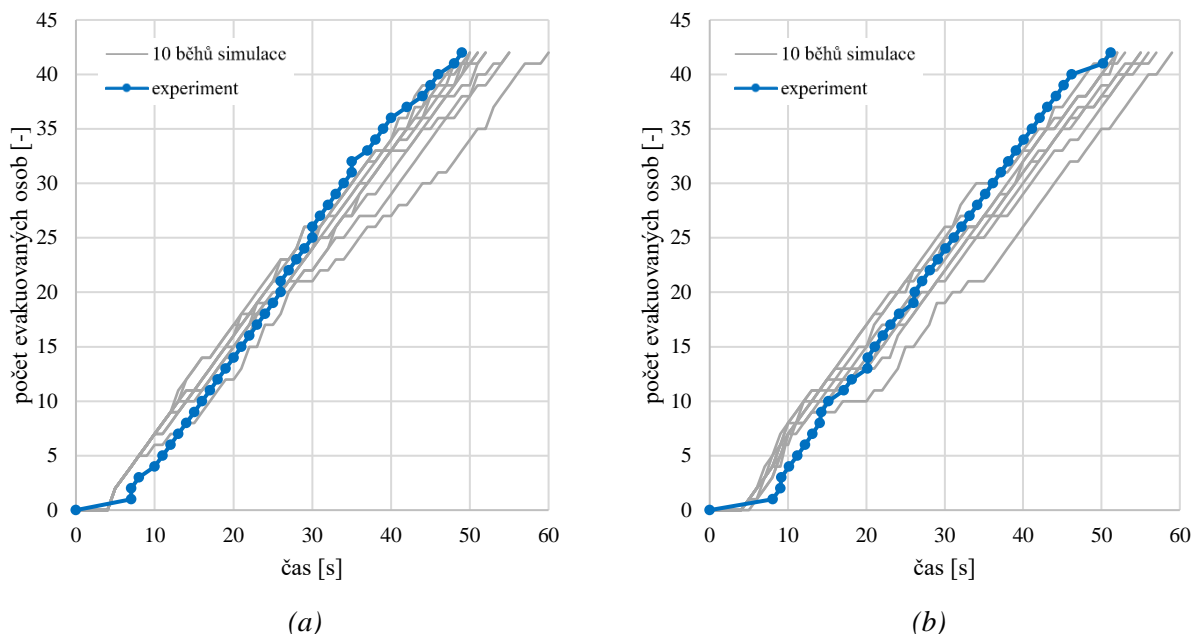


obr. 16 Výstup na nástupiště, šířka dveří 900 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

Při evakuaci na nástupiště s šířkou nástupního prostoru 900 mm (obr. 16) lze již pozorovat rozdílné časy evakuace homogenní a heterogenní skupiny. Oproti předchozím grafům mají křivky průběhu evakuace matematické simulace a evakuačního experimentu jiný tvar. V případě evakuace homogenní skupiny osob (obr. 16 (a)) je průběh experimentálních dat rozdílný především tím, že se jednalo o první běh evakuačního experimentu. Z tohoto důvodu velké množství figurantů nebylo připraveno tak jako v případě následujících běhů, čas do zahájení pohybu byl tedy delší. Dalším vlivem zdržení osob při evakuačním experimentu, ke kterému došlo na začátku evakuace byly uzavřené automatické posuvné vnitřní dveře oddělující dolní oddíl od nástupního prostoru. Tyto dveře tak museli figuranti v průběhu evakuace otevřít pomocí tlačítka, přičemž doba do plného otevření je 4 s. Tomuto zdržení figurantů nacházejících se v dolním podlaží došlo i při dalších evakuačních scénářích, jak je uvedeno dále. V případě evakuace heterogenní skupiny osob (obr. 16 (b)) je rozdílný průběh evakuace matematické simulace oproti experimentu způsoben zdržením figurantů heterogenní skupiny, kteří neslyšeli pokyn k zahájení evakuace, což byl hvizd píšťalky. Heterogenní skupina tak reagovala až po zahájení evakuace homogenní skupiny, která opouštěla druhou polovinu vozu a dle video analýzy bylo toto zdržení cca 4-5 s [1].



obr. 17 Výstup na nástupiště, šířka dveří 750 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



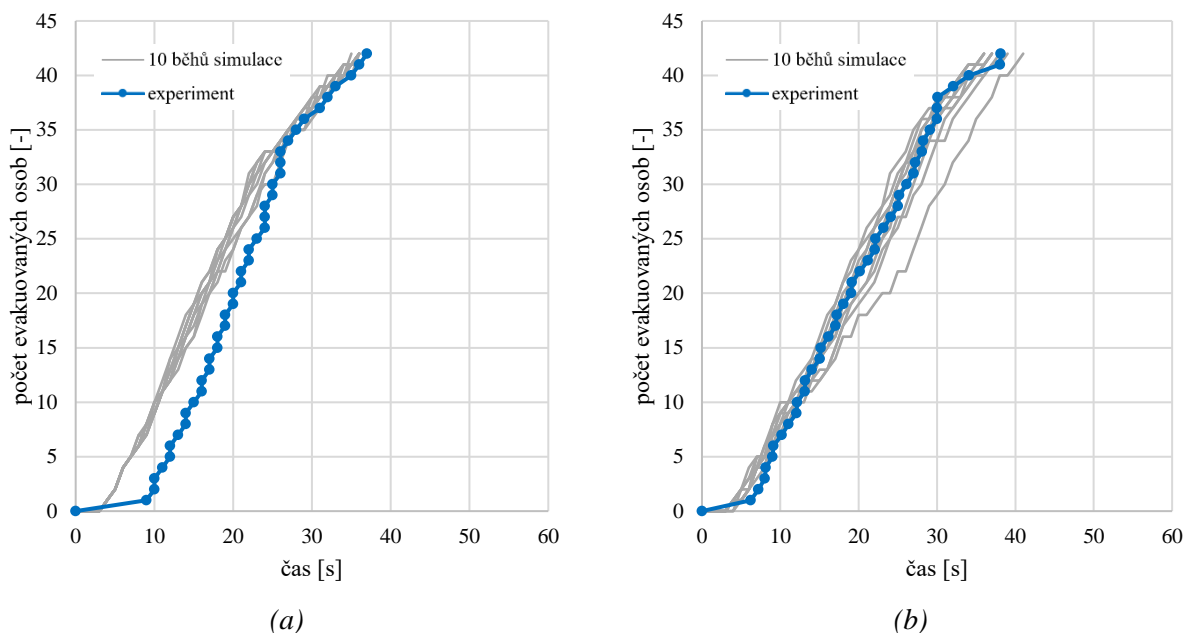
obr. 18 Výstup na nástupiště, šířka dveří 650 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

V případě evakuace na nástupiště s šířkou nástupního prostoru 750 mm a 650 mm (obr. 17 a obr. 18) jsou celkové časy matematických simulací evakuace heterogenní skupiny osob o trochu delší než homogenní skupiny osob. Tomu odpovídají i experimentální data, kde i přes motivaci heterogenní skupiny popsané výše došlo k mírnému prodloužení doby evakuace.

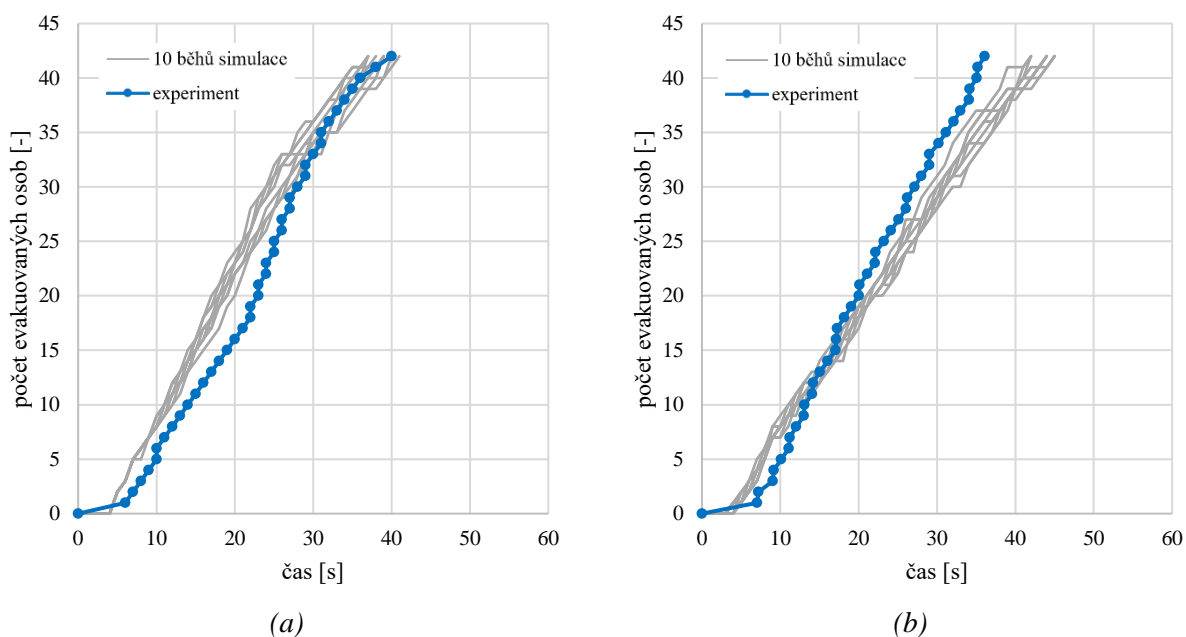
Při simulaci evakuace osob na nástupiště (obr. 14 až obr. 18) vycházely výsledné celkové evakuační časy většinou delší, nebo stejné jako při evakuačním experimentu. To ukazuje na značnou přesnost modelu a zároveň je model na straně bezpečné, navíc v modelu evakuace nedocházelo k vlivu učení figurantů tak jako při evakuačním experimentu. Dalším vyzorovaným jevem u evakuace na nástupiště je, že při zmenšující se šířce nástupního prostoru se zvětšuje rozptyl evakuačního času, a to u obou skupin osob. Tento rozptyl výsledného času je při šířce nástupního prostoru 650 mm (obr. 18) dokonce více než 10 s. Předpokládanému prodloužení času evakuace u heterogenní skupiny osob oproti homogenní skupině osob nedocházelo u evakuačního experimentu ani u výsledků z modelu evakuace, a to i přes omezení rychlostí a úpravě rozměrů některých agentů v heterogenní skupině viz část 3.3.4.

3.3.6.2 Evakuované osoby v čase – evakuace po schodišti

Dále jsou uvedeny grafy evakuovaných osob v čase při evakuaci z vlakového vozu na okolní terén po schodišti. Pro model evakuace byly nastaveny opět stejné okrajové podmínky pro homogenní a heterogenní skupinu osob, stejně jako pro výstup na nástupiště a pouze bylo přidáno schodiště, které ovlivňovalo pohyb z výstupních dveří.



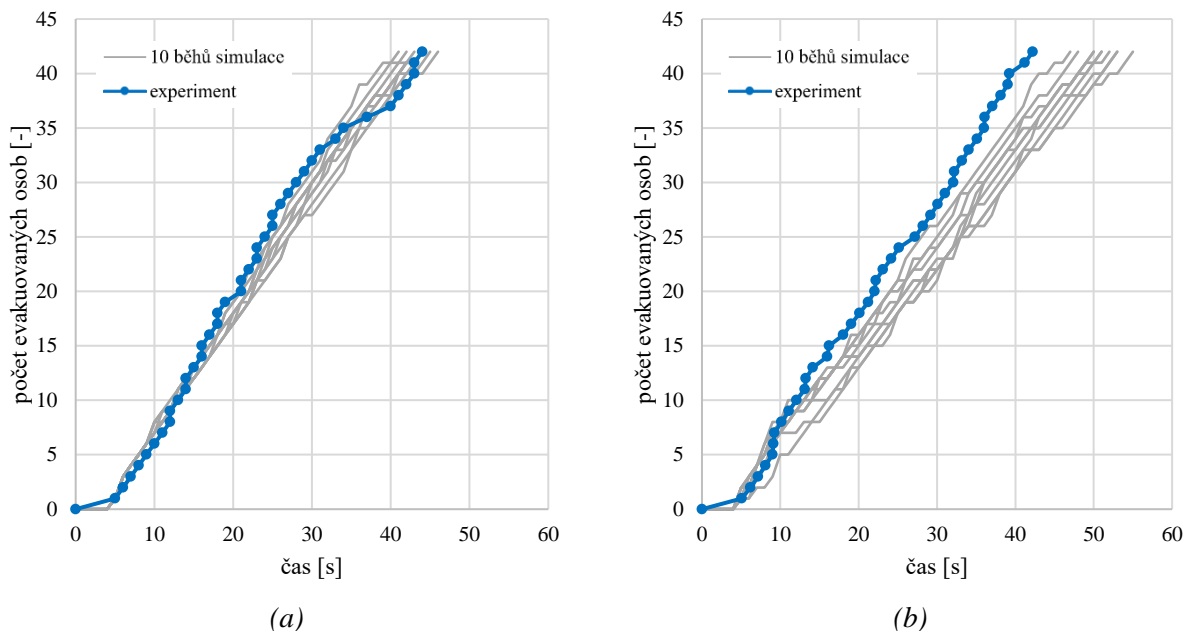
obr. 19 Výstup po schodišti, šířka dveří 1340 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



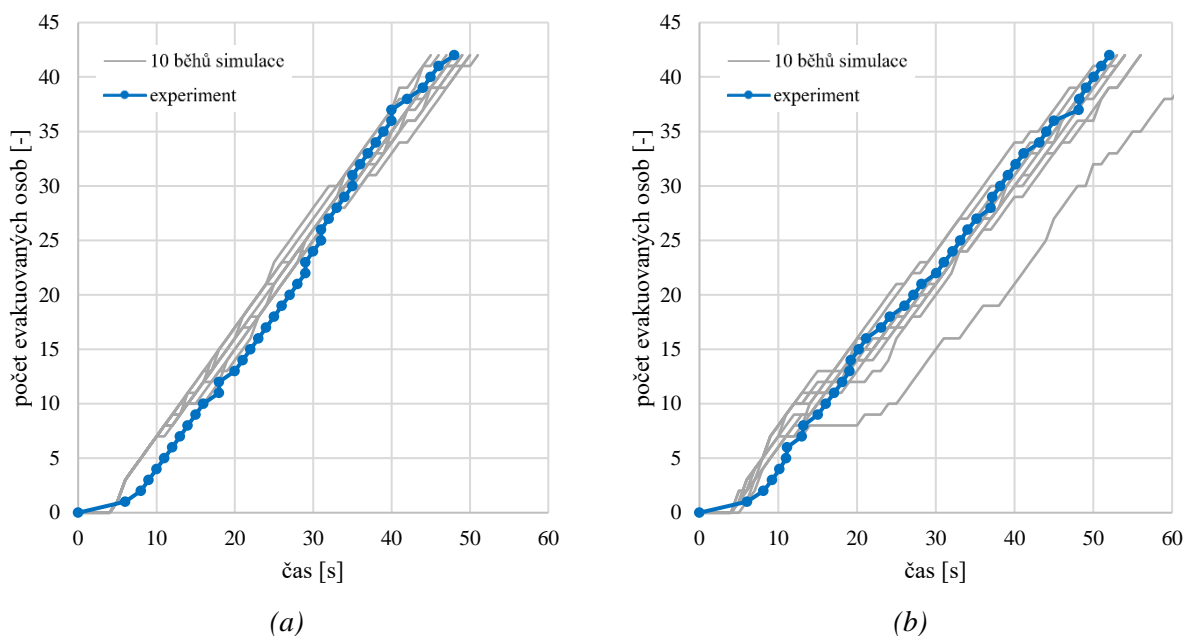
obr. 20 Výstup po schodišti, šířka dveří 1100 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

Výsledky simulace evakuace po schodišti jsou při velké šířce nástupního prostoru (obr. 19 a obr. 20) značně podobné výsledkům evakuace na nástupiště, což odpovídá i výsledkům z evakuačního experimentu. Mírný odklon experimentálních dat od výsledků matematické simulace v počáteční fázi evakuace lze pozorovat pouze u evakuace homogenní skupiny osob při plné šířce nástupního prostoru (obr. 19(a)), což lze opět vysvětlit vlivem zavřených vnitřních posuvných automatických dveří. Zavřené vnitřní dveře však zásadně neovlivňovaly celkovou dobu evakuace, neboť v polovině případů byl při evakuačním experimentu prvním evakuovaným figurant ze spodního, v polovině případů z horního oddílu a zároveň byly posledními

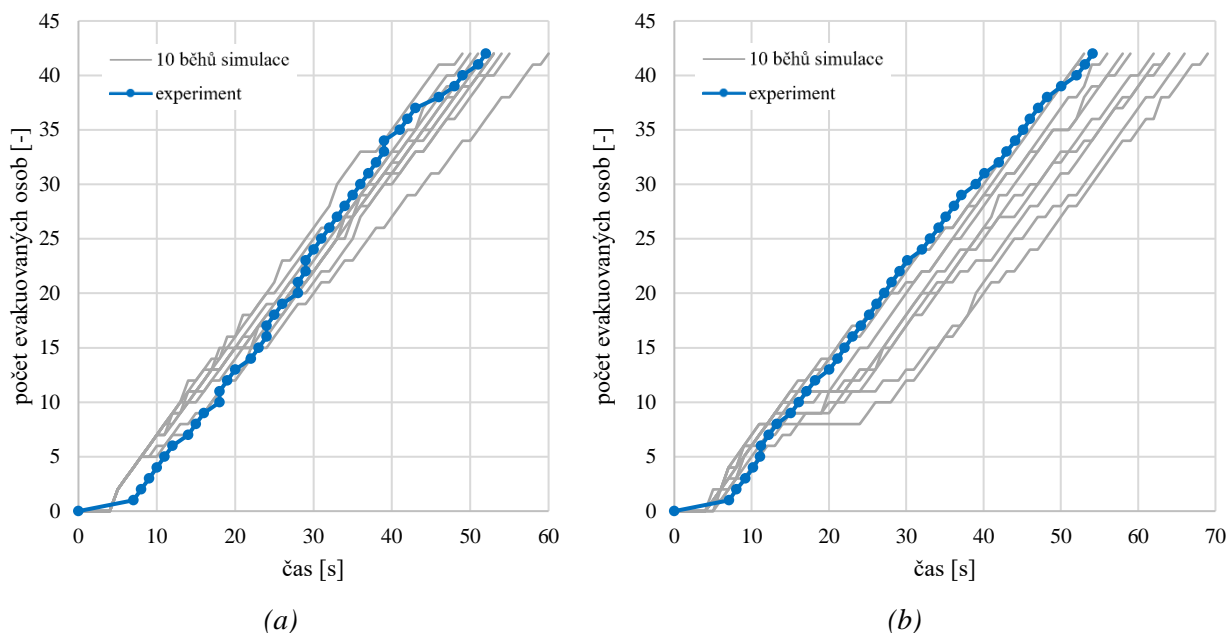
evakuovanými vždy figuranti z horního oddílu. To znamená, že celková doba evakuace byla vždy přibližně stejná, jen se lehce změnil průběh evakuace. Pro potřeby této práce navíc nebylo podstatné do modelu evakuace zahrnout tento průběh evakuace, a proto v těchto několika případech neodpovídají šedé křivky znázorňující počet evakuovaných osob v čase z matematické simulace modré křivce získané z měření při experimentu.



obr. 21 Výstup po schodišti, šířka dveří 900 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



obr. 22 Výstup po schodišti, šířka dveří 750 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



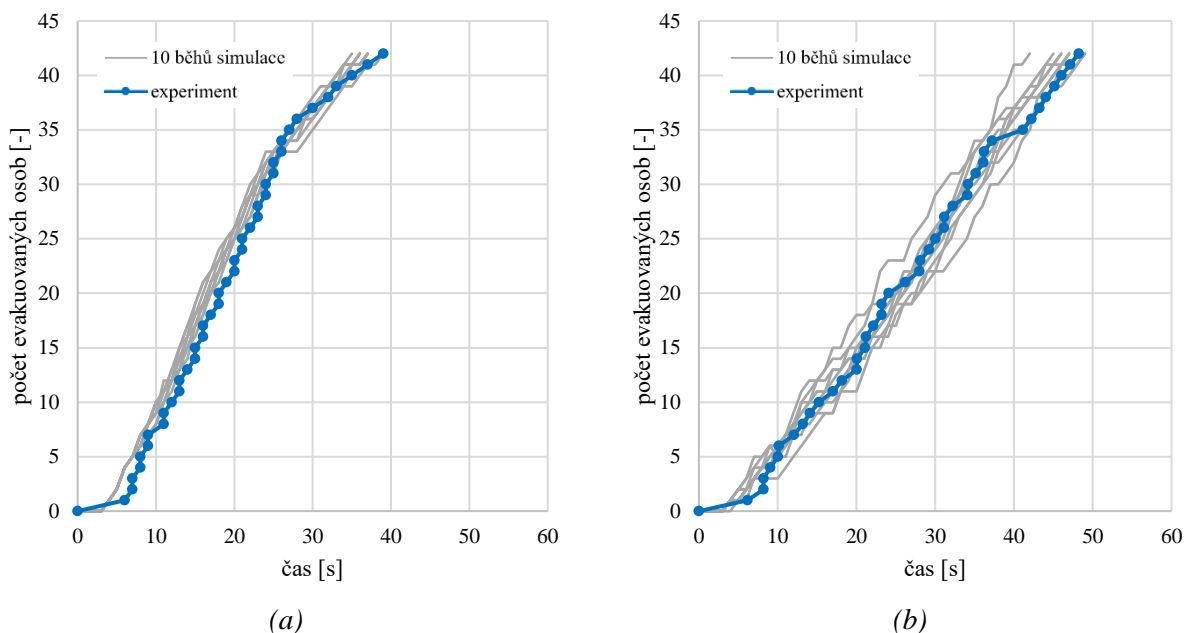
obr. 23 Výstup po schodišti, šířka dveří 650 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

Vliv evakuace z vlakového vozu po schodišti se na celkovém času evakuace u matematických simulací lehce promítl až při menších šířkách nástupního prostoru (obr. 21 až obr. 23). Tomu odpovídají i experimentální data. Navíc u experimentálních dat v případě výstupu z vlakového vozu po schodišti na okolní terén nedochází k tomu, že by heterogenní skupina osob měla kratší dobu evakuace než homogenní skupina osob, tak jako se dělo v několika případech evakuace z vlakového vozu na nástupiště.

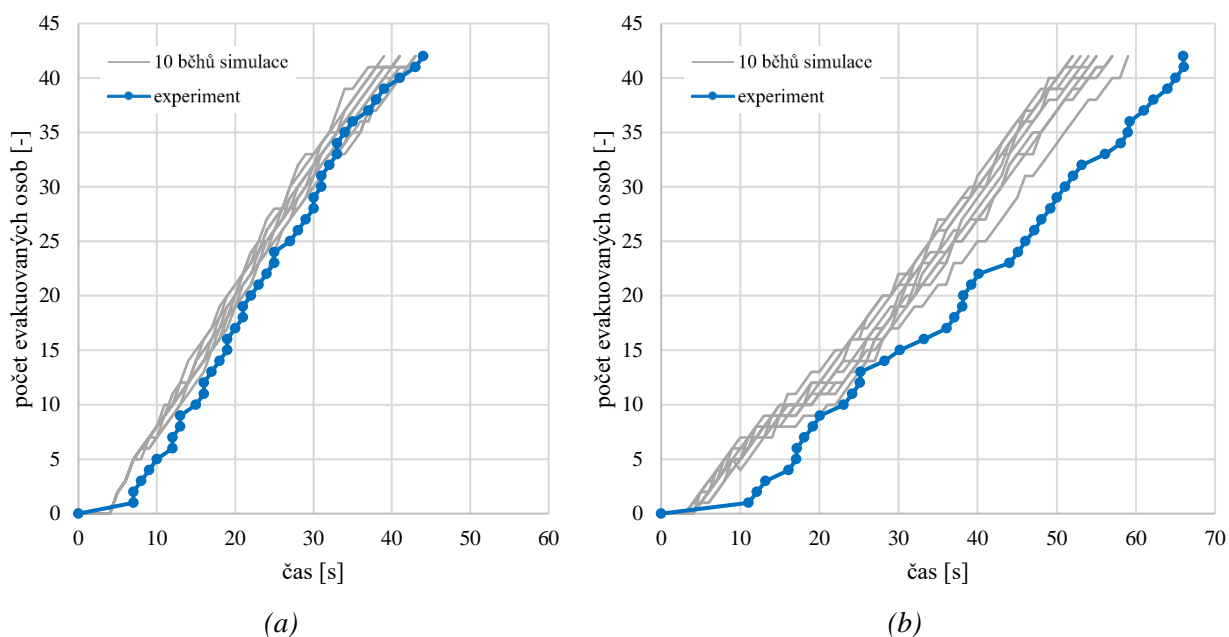
Na obr. 22 (b) lze u výsledků matematické simulace pozorovat v úvodu zmíněný odlehlý výsledek, který by mohl ovlivnit tvar případné průměrované křivky. Na obr. 23 (b) pak lze pozorovat větší rozptyl hodnot výsledků matematické simulace a podobný odlehlý výsledek, jenž vznikl v důsledku zdržení agenta simulujícího pohyb s berlemi, který se v nástupním prostoru 650 mm několikrát dostal do „konfliktu“ s ostatními agenty.

3.3.6.3 Evakuované osoby v čase – evakuace na terén v úrovni kolejiště

Posledním modelovaným typem výstupu byla evakuace mimo nástupiště přímo na okolní terén v úrovni kolejiště. Překonávaný výškový rozdíl byl přibližně 750 mm. Níže jsou opět uvedeny grafy evakuovaných osob v čase jak homogenní, tak i heterogenní skupiny osob. Oproti výstupu na nástupiště a po schodišti z vlakové jednotky musely však být pro heterogenní skupinu osob vytvořeny speciální podmínky při výstupu na terén v úrovni nástupiště, viz část 3.3.4. Méně zdatné osoby vyskytující se v heterogenní skupině osob totiž měly při překonávání výškového rozdílu daleko větší potíže než při pohybu po rovině či po schodišti. U homogenní skupiny osob nebylo třeba žádných dodatečných omezení v nastavení chování agentů, homogenní skupina osob má tedy u všech typů výstupů stejné parametry.



obr. 24 Výstup na terén, šířka dveří 1340 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

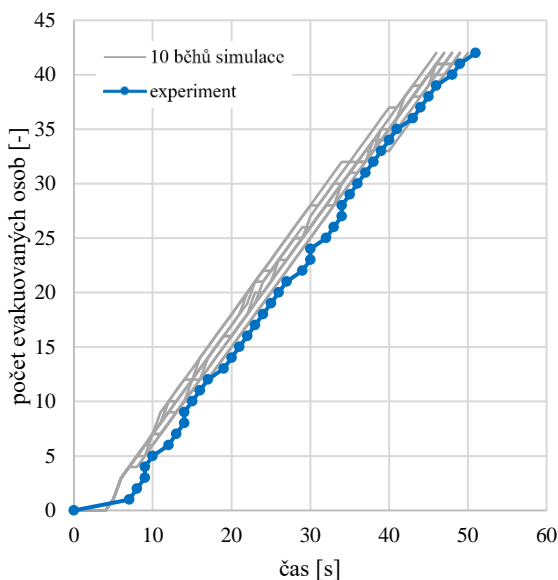


obr. 25 Výstup na terén, šířka dveří 1100 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

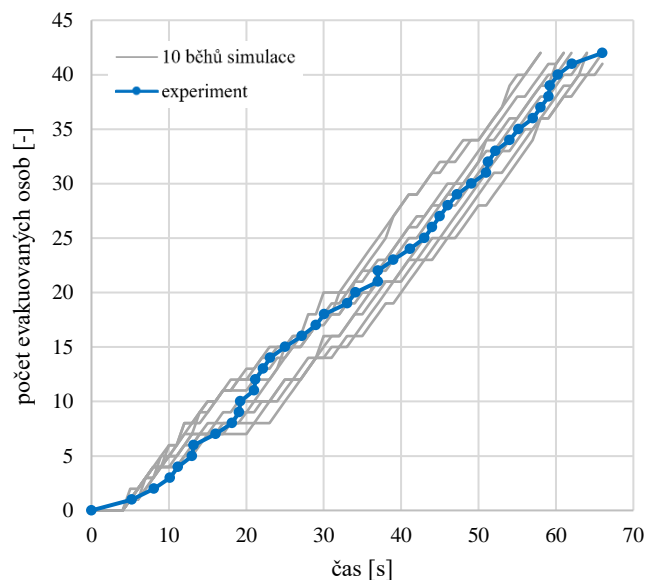
V případě výstupu z vlakového vozu přímo na okolní terén nebylo možné výškový rozdíl v modelu evakuace programu Pathfinder simulovat jinak než pomocí schodiště, které mělo jeden stupeň výšky 750 mm., viz část 3.3.3. Překvapivě se ukázalo, že toho řešení simulace evakuace v kombinaci s omezením, kterým byl maximální počet dvou současně seskakujících agentů z vlakového vozu, dobře odpovídá výsledkům evakuace homogenní skupiny při evakuačním experimentu (obr. 24 (a) a obr. 25 (a)). Oproti tomu byl průběh evakuace heterogenní skupiny osob při různých šířkách nástupního prostoru u evakuačním experimentu natolik rozdílný, že si vyžádal specifickou úpravu chování agentů v modelu evakuace, kteří měli představovat méně zdatné

osoby. Jiné nastavení základních specifických vlastností agentů charakterizující méně zdatné a pohybově omezené osoby (rychlost pohybu a šířka ramen) postrádalo smysl, neboť v případě výstupu na nástupiště a po schodišti bylo dostatečné a odpovídaly výsledkům experimentu. Z tohoto důvodu bylo méně zdatným a pohybově omezeným osobám přiřazeno chování, které simulovalo nízkou zdatnost při výstupu na terén v úrovni kolejiště, viz část 3.3.4.

Průběhy evakuace z matematických simulací heterogenní a homogenní skupiny osob na terén (obr. 24 a obr. 25) jsou více rozdílné než výstupy z vlakového vozu na nástupiště a po schodišti, což odpovídá i experimentálním datům. V případě výstupu heterogenní skupiny při šířce nástupního prostoru 1100 mm (obr. 25 (b)) však experimentální data příliš neodpovídají výsledkům matematické simulace. Při tomto výstupu z vlakového vozu došlo u evakuačního experimentu hned k několika událostem současně, vlivem kterých byla celková doba evakuace odlišná od jiných běhů. První z nich byly uzavřené vnitřní dveře mezi dolním oddílem a nástupním prostorem, toto zdržení je již popsáno výše. Tím, že byly zdrženy osoby z dolního oddílu, dostaly se na hranu výstupu jako první tři malé děti, které šly před svými rodiči a zablokovaly výstup. Ty však nebyly schopné bez asistence rodičů vlakový vůz opustit, přičemž se kolem nich protáhlo několik figurantů, ale vyřešení situace zabralo více jak 10 s. Tato zdržení v kombinaci s faktem, že se jednalo o první výstup na terén se tak promítla výrazně do celkové doby evakuace. I přesto, že výsledky simulace neodpovídají v tomto případě výsledku naměřeného během evakuačního experimentu, lze považovat model evakuace za dostatečně realistický, a to díky ostatním běhům (obr. 24 (b), obr. 26 (b), obr. 27 (b) a obr. 28 (b)).

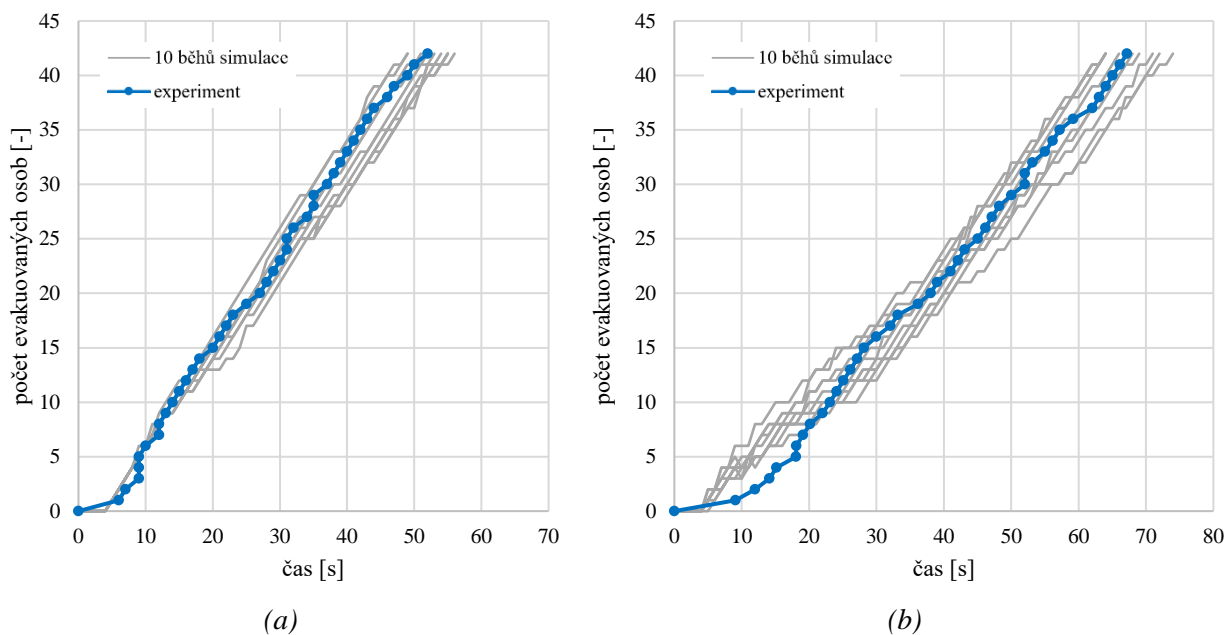


(a)

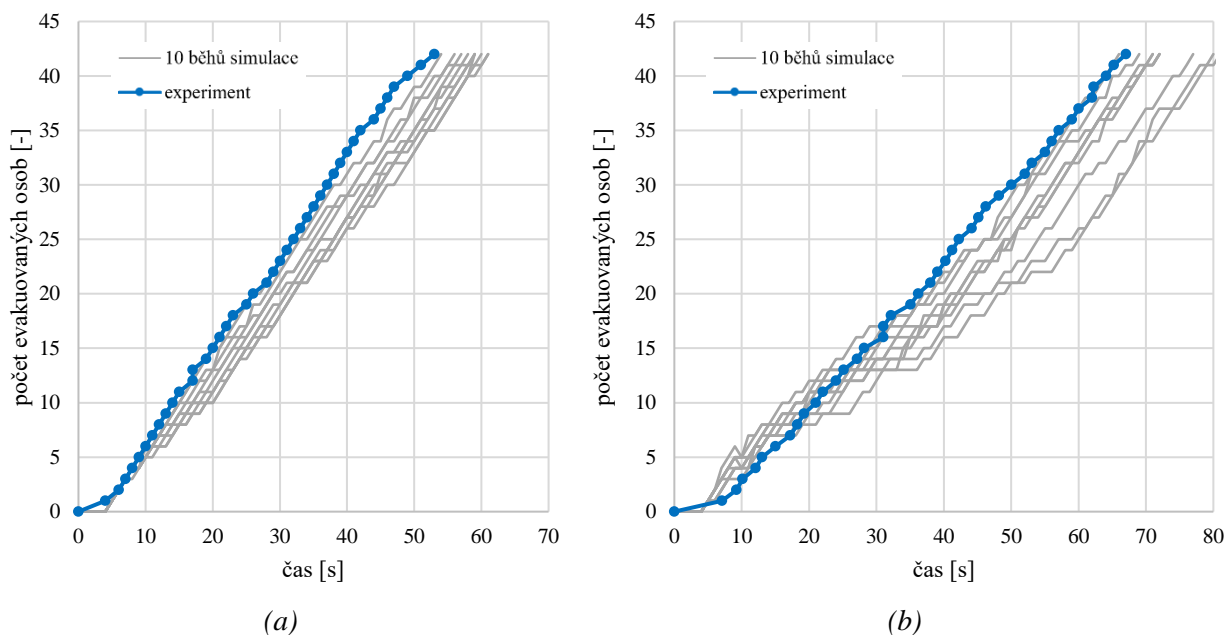


(b)

obr. 26 Výstup na terén, šířka dveří 900 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



obr. 27 Výstup na terén, šířka dveří 750 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina



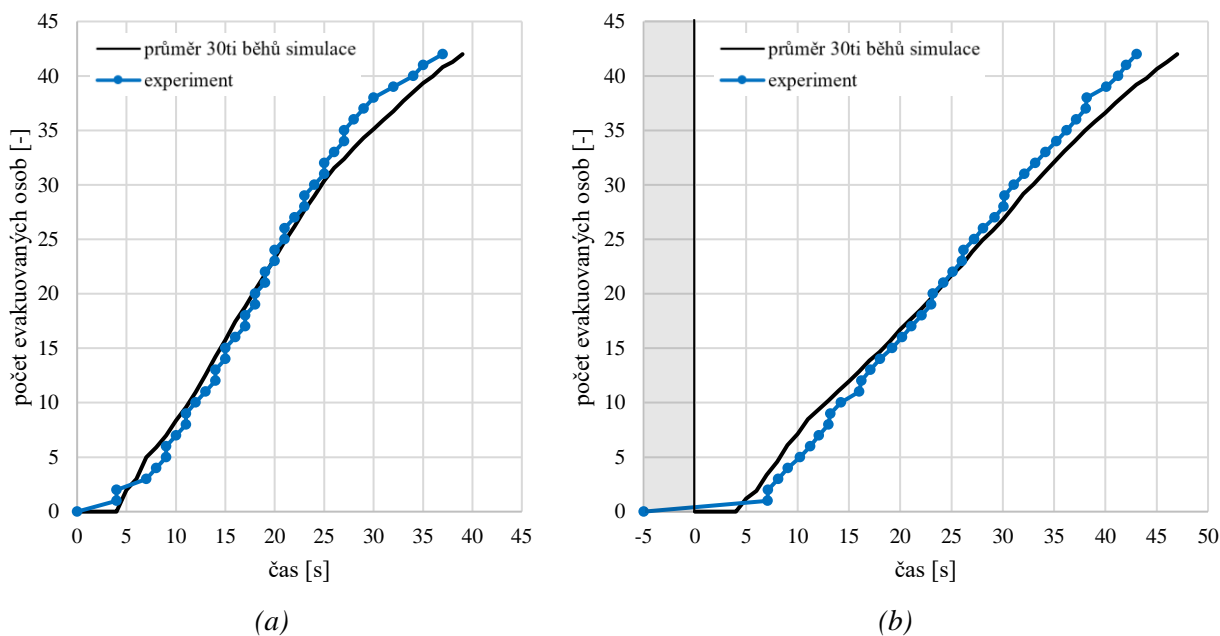
obr. 28 Výstup na terén, šířka dveří 650 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina

Se snižující se šířkou nástupního prostoru (obr. 26 až obr. 28) se celková doba evakuace získaná z matematických simulací homogenní skupiny při evakuaci na terén příliš neliší od předchozích typů výstupů. Oproti tomu jsou výsledné časy z modelu evakuace u heterogenní skupiny se snižující se šířkou nástupního prostoru delší a mají větší rozptyl. Oběma simulovaným skupinám při těchto evakuačních scénářích dobře odpovídají výsledky naměřené z evakuačního experimentu.

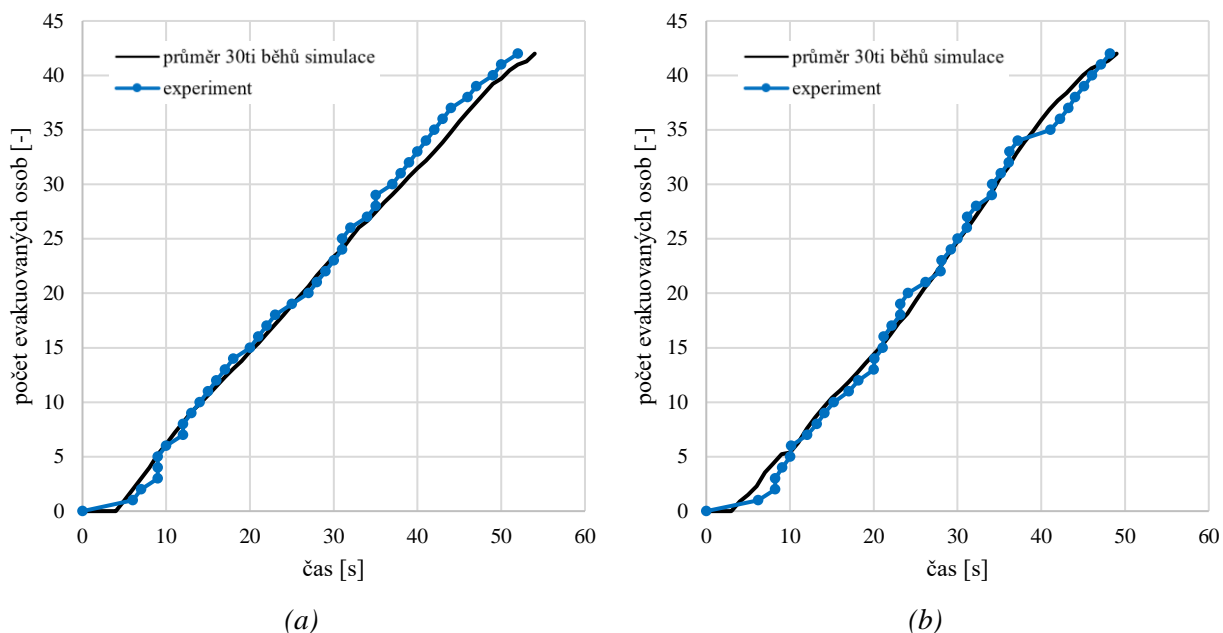
3.3.7 Validace modelu evakuace

Model evakuace byl validován na základě získaných výsledků matematické simulace, které odpovídají experimentálním datům. V části 3.3.6 byly porovnávány křivky evakuovaných osob v čase, a to všech třiceti evakuačních scénářů uskutečněných při evakuačním experimentu s deseti křivkami jednotlivých běhů matematické simulace evakuačních scénářů. Níže jsou v této části porovnány a vyhodnoceny také čtyři vybrané evakuační scénáře. Porovnána je vždy průměrná křivka evakuovaných osob v čase, a to třiceti běhů matematické simulace a křivka získaná z evakuačního experimentu. Pro porovnání byla k dispozici průměrná hodnota 30 běhů matematické simulace, neboť v rámci následně prováděné citlivostní analýzy modelu evakuace bylo uskutečněno dalších dvacet běhů jednotlivých evakuačních scénářů.

Na obr. 29 a obr. 30 jsou porovnány křivky evakuovaných osob v čase získané z evakuačního experimentu a zprůměrované křivky 30 běhů matematické simulace u vybraných evakuačních scénářů, porovnání křivek ostatních evakuačních scénářů je dobře patrné z grafů v části 3.3.6. Průběhy evakuace z matematických simulací se velmi podobají experimentálním datům a průměrné celkové doby evakuace jsou stejné nebo delší než v případě evakuačního experimentu. V případě evakuace heterogenní skupiny na nástupiště s šířkou nástupního prostoru 1100 mm došlo při evakuačním experimentu ke zpoždění figurantů, kteří neslyšeli hvizd píšťalky, což byl pokyn k zahájení evakuace. Proto byla na obr. 29 (b) u experimentálních dat provedena korekce času zahájení evakuace a to o 5 s.



obr. 29 Porovnání křivky evakuovaných osob v čase získané z evakuačního experimentu a zprůměrované křivky 30 běhů matematické simulace (a) homogenní skupina osob, výstup na nástupiště, šířka výstupu 1100 mm; (b) heterogenní skupina osob, výstup na nástupiště, šířka výstupu 900 mm



obr. 30 Porovnání křivky evakuovaných osob v čase získané z evakuačního experimentu a zprůměrované křivky 30 běhů matematické simulace (a) homogenní skupina osob, výstup na terén, šířka výstupu 750 mm; (b) heterogenní skupina osob, výstup na terén, šířka výstupu 1340 mm

Průběhy evakuačních experimentů se velice blíží průběhům z matematické simulace evakuace v programu Pathfinder. Model lze prohlásit za validovaný pro situaci nouzové evakuace z vlakového vozu při různých situacích. Těmito okrajovými podmínkami jsou tři měněné parametry:

- heterogenita davu;
- typ výstupu;
- šířka výstupu.

Přičemž se jedná o evakuaci za běžných podmínek ve dne, bez snížené viditelnosti a bez ohrožení cestujících účinkem požáru, která započne až po zastavením vlakového vozu. Z hlediska heterogenity davu je model validován pro konkrétní homogenní skupinu osob (pouze mladé zdatné osoby) a heterogenní skupinu osob (zdatné i pohybově omezené osoby všech věkových kategorií), podrobná charakteristika obou skupin je uvedena v částech 3.2.3 a 3.3.4. Z hlediska typu výstupu je model validován pro výstup na nástupiště, po schodišti a na terén, viz část 3.2.5. Současně bylo ověřeno, že model dokáže reagovat i na změnu šířky nástupního prostoru vlakové jednotky, která je specifikována v části 3.2.4.

3.3.8 Shrnutí výsledků

V programu Pathfinder byl vytvořen model evakuace nouzového výstupu z vlakové jednotky CityElefant, v rámci kterého bylo simulováno třicet evakuačních scénářů. Modelová situace vychází z uskutečněného evakuačního experimentu a získaná experimentální data byla použita nejen jako vstupní parametry do modelu evakuace, ale i pro ověření, že výsledky modelu evakuace jsou přesné.

Model evakuace byl validovaný na základě získaných výsledků matematické simulace, které odpovídají experimentálním datům. Vytvořený model evakuace je validovaný pro situaci nouzové evakuace z vlakového vozu při různých situacích. Přičemž se jedná o evakuaci za běžných podmínek ve dne, bez snížené viditelnosti a bez ohrožení cestujících účinkem požáru, která započne až po zastavením vlakového vozu. Z hlediska heterogenity davu je model validován pro konkrétní homogenní skupinu osob (pouze mladé zdatné osoby) a heterogenní skupinu osob (zdatné i pohybově omezené osoby všech věkových kategorií). Z hlediska typu výstupu je model validován pro výstup na nástupiště, po schodišti a na terén. Současně bylo ověřeno, že model dokáže reagovat i na změnu šířky nástupního prostoru vlakové jednotky.

Z výsledků získaných z evakuačního experimentu lze pozorovat závislosti heterogenity davu, typu výstupu a rozměru nástupního prostoru. Stejně závislosti lze pozorovat i u výsledků z modelu evakuace, jak je patrné z výše uvedených grafů, kde jsou porovnávány jednotlivé evakuační scénáře. Dále je z uskutečněného experimentu a matematické simulace patrné, že při velkých šířkách nástupního prostoru (do 900 mm) a fyzicky nenáročných typech výstupu z vlakového vozu (na nástupiště a po schodišti) jsou výsledné evakuační časy homogenní skupiny osob a heterogenní skupiny osob srovnatelné. Z toho vyplývá, že je možné simulovat evakuaci z vlakového vozu v programu Pathfinder i bez uvažování méně zdatných a pohybově omezených osob, ale to pouze při několika konkrétních situacích. V ostatních případech se vliv složení cestujících z hlediska věku a pohybové zdatnosti ukazuje jako významný, s čímž úzce souvisí vstupní parametry zadávané do modelu evakuace. Vstupní parametry jako rychlost pohybu osob a šířka ramen zadávaných do programu Pathfinder postačují u typu výstupu na nástupiště a po schodišti, nicméně není možné s jejich pomocí simulovat pohyb při překonávání výškového rozdílu u přímého výstupu na terén. Při tomto typu výstupu docházelo u heterogenní skupiny k váhání a rozhodování při překonávání výškového rozdílu a tato zdržení musela být do modelu evakuace implementována pomocí chování agentů.

3.4 Citlivostní analýza základní modelové situace

Studie citlivosti evakuačních scénářů uvedená v této kapitole má za cíl odhalit vliv tří základních parametrů, a to složení skupiny osob, typ výstupu z vlakového vozu a šířku nástupního prostoru vlakového vozu. Zkoumaným výstupním parametrem je celkový čas evakuace z vlakového vozu, a to jak výsledků z validovaného modelu, tak i výsledků získaných z evakuačního experimentu. Citlivostní analýza byla provedena v licencovaném programu optiSLang, jehož licence byla získána pro účely této diplomové práce. Podrobný popis použitého programu a použité metodě je uveden v části 3.4.1. V následujících částech 3.4.2 a 3.4.3 je pak uvedena citlivostní analýza vybraných vstupních parametrů výsledků z validovaného modelu a evakuačního experimentu. Shrnutí poznatků je uvedeno v části 3.4.4.

3.4.1 Použitý nástroj pro citlivostní analýzu

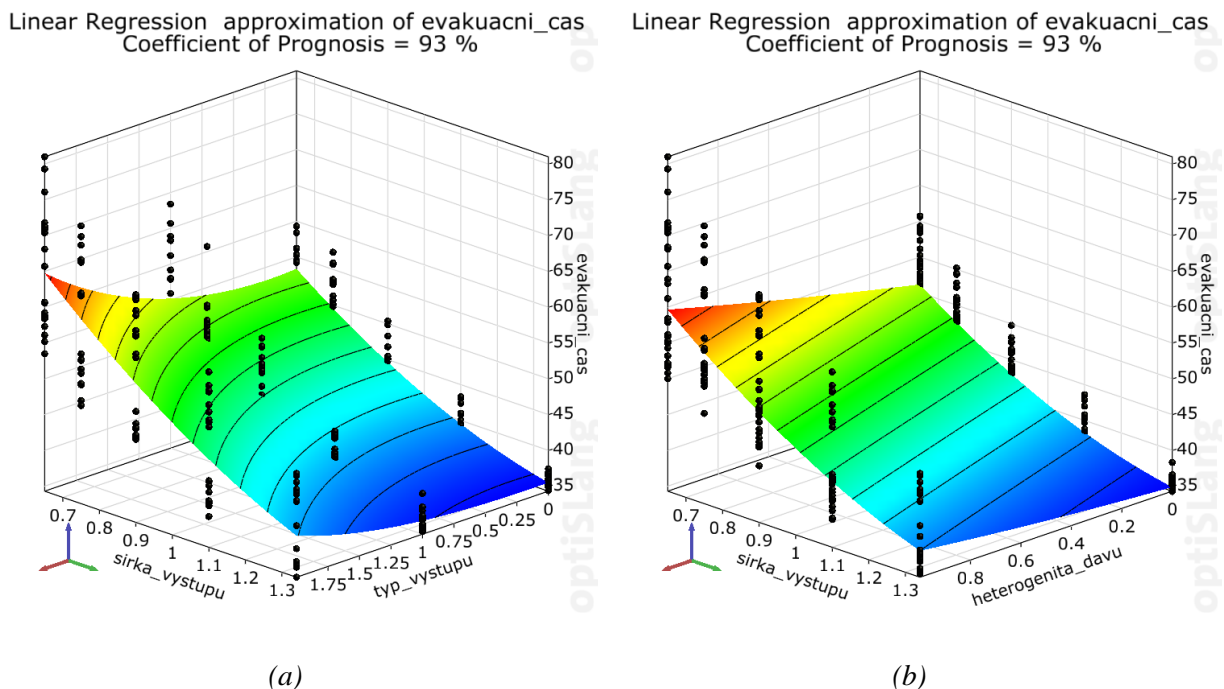
Pro citlivostní analýzu byl vybrán program optiSLang vyvíjený společností Dynaro GmbH. OptiSLang je softwarový nástroj pro citlivostní analýzy, víceúčelové analýzy, multidisciplinární optimalizace, analýzy spolehlivosti a odolnosti, identifikace parametrů a optimalizace robustnosti systému [34]. Pro potřeby této práce je však využita pouze citlivostní analýza. Z hlediska rozdělení uvedeného v rámci literární rešerše v části 2.1 používá program optiSLang globální metody citlivostní analýzy. Prvním krokem citlivostní analýzy programu optiSLang je vytvoření modelu na základě dat do něj vložených. Výběr toho nejvhodnějšího modelu automaticky zajišťuje Meta-model of Optimal Prognosis (MOP), který lze volně přeložit jako metamodel optimální prognózy [35]. Tento model je založený na hledání optimální množiny vstupních proměnných, tedy rozhoduje o signifikanci jednotlivých proměnných. Dále je vytvořen nejvhodnější aproximační model (polynomiální regrese nebo lineární, resp. kvadratické lokální regrese) a současně se vypustí nepodstatné proměnné, čímž se zlepší predikční kvalita modelu. Dalším krokem je vyhodnocení kvality modelu. Pro tento účel se používá další soubor testovacích dat. Shoda mezi reálnými testovými daty a meta-modelovými odhady se měří pomocí tzv. coefficient of prognosis CoP (koeficienty prognózy).

3.4.2 Citlivostní analýza validovaného modelu evakuace

V této podkapitole je validovaný model podroben citlivostní analýze vstupních parametrů v závislosti na celkovém evakuačním čase. K tomu je v první fázi použito všech třicet evakuačních scénářů s deseti běhy simulací, které posloužily k validaci modelu evakuace, celkem tedy 300 evakuačních simulací.

Už pomocí grafů uvedených v části 3.3.5 lze jednoduše odvodit, že šířka nástupního prostoru má značný vliv na průběh evakuace, ale díky citlivostní analýze je možné vyčíslit její význam s ohledem na ostatní vstupní parametry. Z globálního pohledu na modelované evakuační scénáře lze pozorovat, že vliv šířky nástupního prostoru je téměř lineární jak u typu výstupu (obr. 31 (a)), kde hodnota 0 je výstup na nástupiště, hodnota 1 výstup po schodišti a hodnota 2 výstup na terén,

tak i u heterogenity davu (obr. 31 (b)), kde hodnota 0 je homogenní skupina a hodnota 1 heterogenní skupina.

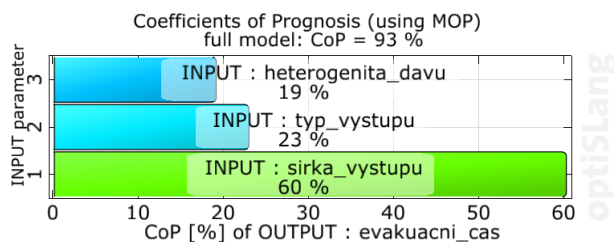


obr. 31 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry (a) šířku výstupu a typ výstupu; (b) šířku výstupu a heterogenitu davu

Měřítkem samotné citlivosti zkoumaného výstupního parametru na jednotlivé vstupní parametry jsou koeficienty prognózy (CoP) jednotlivých parametrů (obr. 32). CoP konkrétní proměnné je vyjádřen jako součin CoP celého metamodelu a koeficientu citlivosti metamodelu $S_T^{MOP}(X_i)$ na tuto konkrétní proměnnou, jak je patrné z následující rovnice:

$$CoP(X_i) = CoP * S_T^{MOP}(X_i) \tag{2}$$

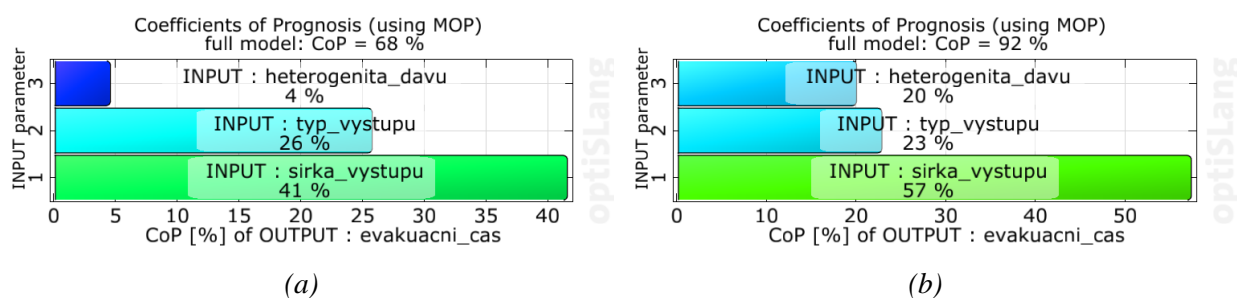
Při sečtení všech CoP jednotlivých parametrů na obr. 32 vychází hodnota 102 %, přičemž koeficient prognózy celého modelu 93 %, tato odchylka je způsobená vzájemným spolupůsobením vstupních parametrů.



obr. 32 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, 10 běhů simulací

Z výsledků na obr. 32 je patrný velký vliv šířky výstupu na evakuační čas. Není však možné z nich například odhadnout, jaký je rozdíl vlivu typu výstupu mezi evakuačními scénáři s homogenní a heterogenní skupinou osob. Tato analýza vždy z pohledu jednoho parametru je uvedena v částech 3.4.2.1., 3.4.2.2 a 3.4.2.3.

Z hlediska toho, že vytvořený model evakuace v programu Pathfinder je stochastický, bylo nutné ověřit, jaký vliv má počet běhů jednotlivých evakuačních scénářů na výsledky citlivostní analýzy. Z tohoto důvodu byla provedena citlivostní analýza základního modelu evakuace celkem třikrát. Poprvé bylo použito všech třicet evakuačních scénářů s deseti běhy simulací, které posloužily k validaci modelu evakuace, celkem tedy 300 evakuačních simulací (obr. 32). Podruhé se pro každý evakuační scénář realizoval pouze jen jeden běh simulace s jednoznačně přiřazenými hodnotami pro rozhodování tzv. rseed viz část 3.3.5. Tato situace odpovídá evakuačnímu experimentu, kde jednotlivé evakuační scénáře také nebyly opakovány (obr. 33 (a)). Třetí analyzovanou skupinou výsledků modelu evakuace byly evakuační scénáře s třiceti běhy simulace, celkem tedy bylo analyzováno 900 evakuačních simulací (obr. 33 (b)).

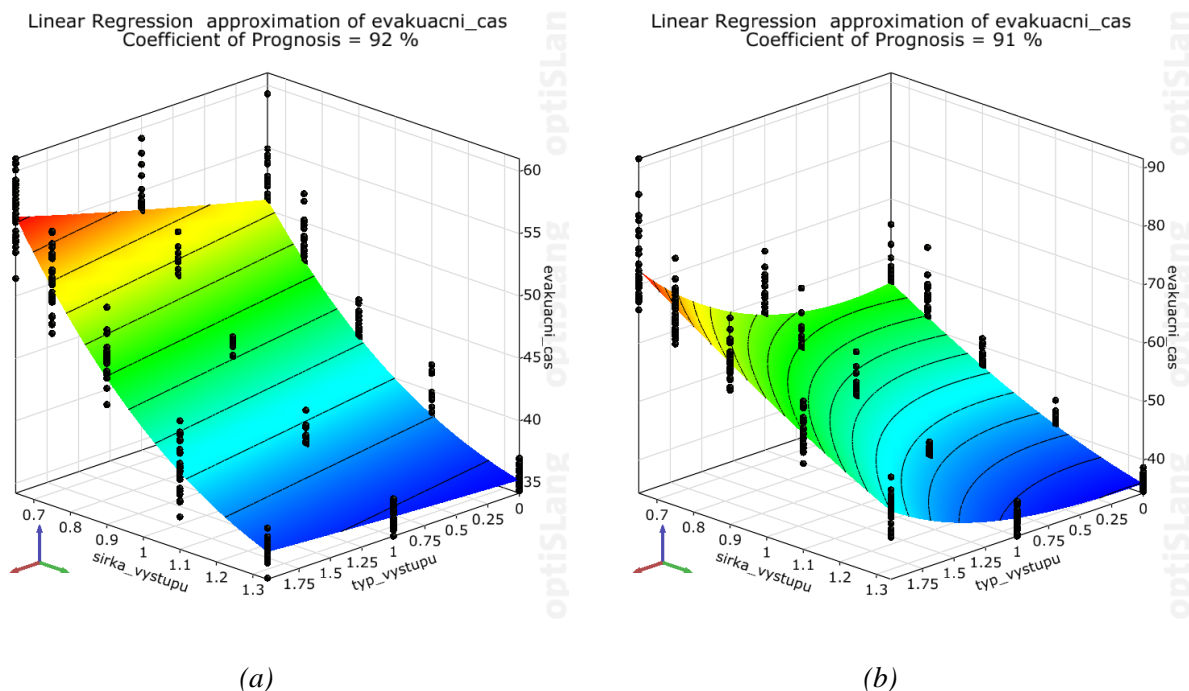


obr. 33 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, (a) jeden běh simulace; (b) 30 běhů simulace

Z porovnání výsledných koeficientů prognózy na obr. 32 a obr. 33 lze vyhodnotit, že počet 10 opakování jednotlivých evakuačních scénářů je dostatečný, neboť rozdíl ve výsledcích citlivostní analýzy u modelu s 30 opakováními je téměř zanedbatelný. Oproti tomu bylo potvrzeno, že není možné získat odpovídající výsledky citlivostní analýzy pouze z jednoho běhu simulace při snaze zanedbat stochastičnost modelu evakuace. I přes tyto závěry je další citlivostní analýza prováděna na modelu evakuace s 30 opakováními, neboť by bylo nesmyslné dále nepoužít tato vypočítaná data.

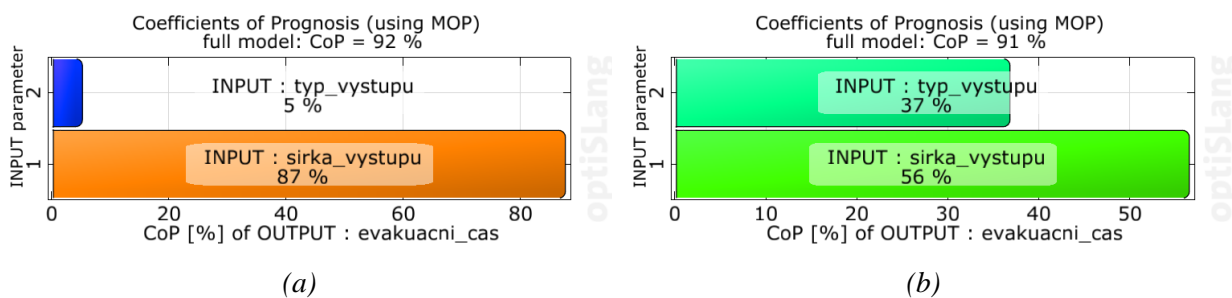
3.4.2.1 Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska heterogenity skupiny osob

Na obr. 34 jsou vidět vizualizace modelu lineární regrese zvláště pro homogenní skupinu osob (obr. 34 (a)) a heterogenní skupinu osob (obr. 34 (b)), přičemž u typů výstupu odpovídají hodnoty 0 výstupu na nástupiště, 1 výstupu po schodišti a 2 výstupu na terén. Jak je patrné z těchto grafů je u homogenní skupiny průběh evakuace u všech typů výstupů velice podobný, oproti tomu jsou celkové evakuační časy heterogenní skupiny výrazně vyšší u jednoho typu výstupu, kterým je výstup na terén.



obr. 34 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry typ výstupu a šířku výstupu: (a) analýza homogenní skupiny osob (b) analýza heterogenní skupiny osob

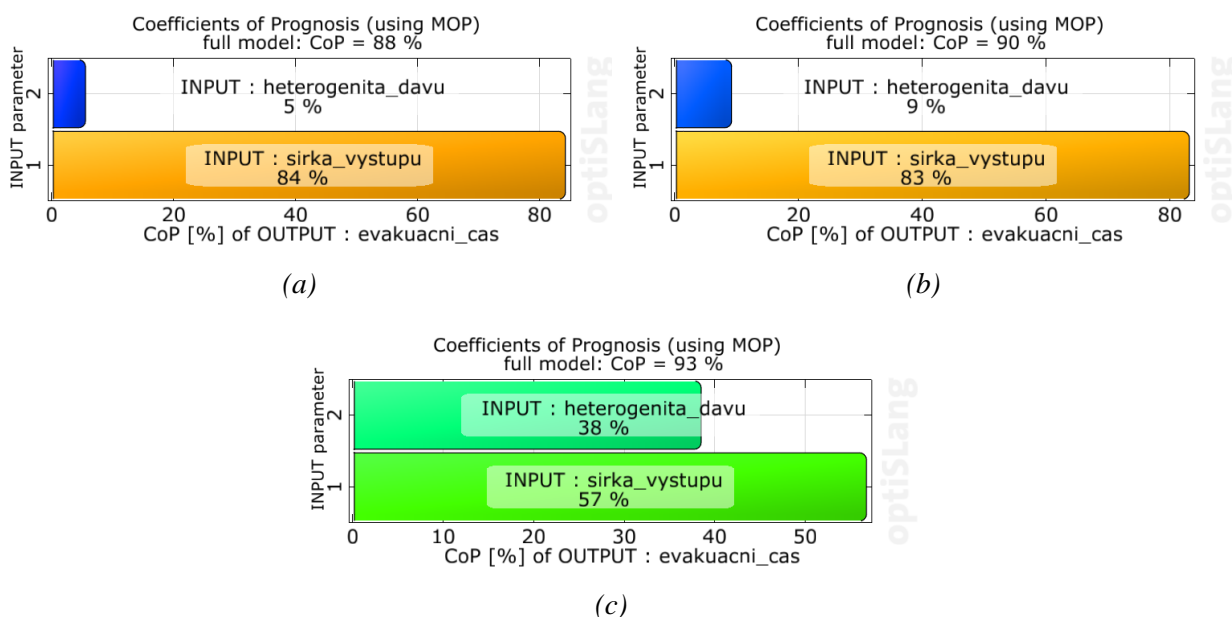
Měřítkem citlivosti jsou koeficienty prognózy jednotlivých parametrů na obr. 35. Ty ukazují, že typ výstupu u homogenní skupiny osob měl vliv pouze 5 % na celkový evakuační čas, za to u heterogenní skupiny to bylo 37 %. Dále je patrné, že podle součtu CoP typu výstupu a šířky výstupu a porovnáním s CoP celého modelu tyto dva parametry spolu téměř nespolutpůsobí a vzájemně tak neovlivňují celkový evakuační čas. U obou je součet jednotlivých CoP 92 %, resp. 93 % což přibližně odpovídá CoP celého modelu 92 %, resp. 91 %.



obr. 35 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob

3.4.2.2 Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska typu výstupu

Obdobně jako vliv typů výstupu u různého složení skupin osob lze hodnotit také vliv heterogenity skupin osob u výstupu na nástupiště, po schodišti a na terén v úrovni kolejiště na celkový evakuační čas. Z výsledků na obr. 36 plyne, že významnost heterogenity skupin osob není při výstupu na nástupiště a po schodišti příliš rozdílná a významnější byl pro heterogenitu skupin osob až výstup na terén v úrovni kolejiště.



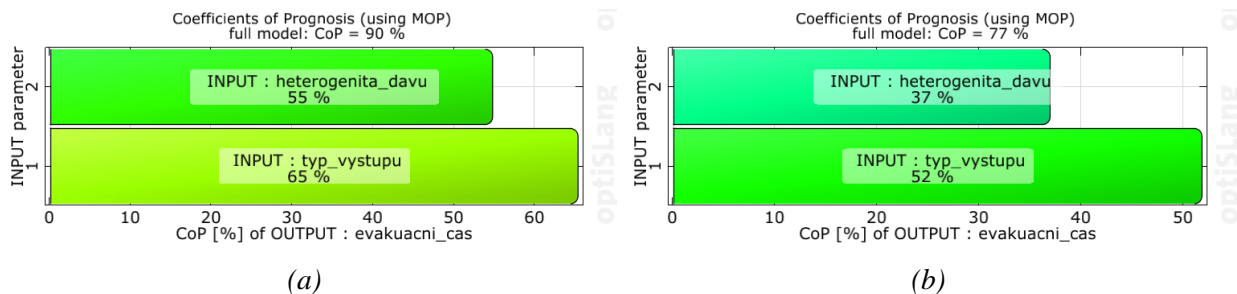
obr. 36 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) na nástupiště; (b) po schodišti; (c) na terén v úrovni kolejiště

3.4.2.3 Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska šířky nástupního prostoru

Při provedení citlivostní analýzy validovaných evakuačních scénářů z pohledu šířky nástupního prostoru (obr. 37) je na první pohled viditelné velké spolupůsobení vstupních parametrů heterogenity davu a typu výstupu, viz rovnici (3), kde $CoP(X_i)$ jsou koeficienty prognózy jednotlivých vstupních parametrů a CoP je koeficient prognózy celého metamodelu.

$$\sum_i CoP(X_i) > CoP \quad (3)$$

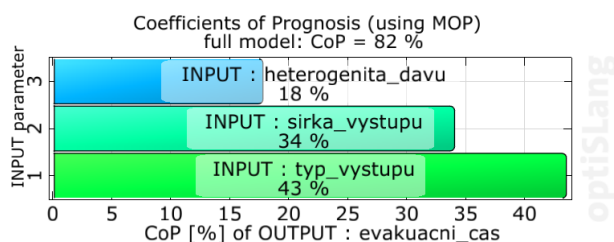
Se zmenšujícím se rozměrem nástupního prostoru postupně klesají koeficienty prognózy obou vstupních parametrů. To lze vysvětlit postupným klesáním koeficientu prognózy metamodelů, který může být způsoben nedostatečným množstvím zkoumaných skupin osob o různém heterogenním složení. Pro ilustraci jsou uvedeny pouze koeficienty prognózy u šířky nástupního prostoru 1340 mm (obr. 37 (a)) a 650 mm (obr. 37 (b)).



obr. 37 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci s šířkou nástupního prostoru (a) 1340 mm; (b) 650 mm

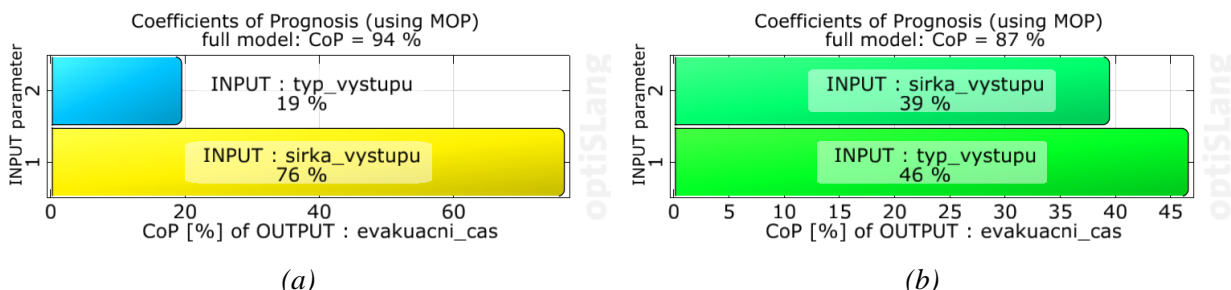
3.4.3 Citlivostní analýza výsledků evakuačního experimentu

Oproti velkému počtu získaných výsledných dat z modelu evakuace vytvořeného v programu Pathfinder byl z evakuačních experimentů získán vždy pouze jeden výsledný čas pro každý z 30 evakuačních scénářů. Tomu odpovídá i vytvořený MOP programu optiSLang, který má důsledkem nedostatečného množství dat nižší CoP (obr. 38), podobně jako výsledky na obr. 33 (a) při citlivostní analýze modelu evakuace bez opakování běhů, které se ukázaly jako nevhodné. Citlivostní analýza výsledků evakuačního experimentu se tedy nemusí přibližovat reálným hodnotám.



obr. 38 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, evakuační experiment

Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska heterogenity skupiny osob (obr. 39) vychází pouze rámcově podobně jako u modelu evakuace, hodnotově se příliš nepřibližuje.



obr. 39 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuačním experimentu (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob

3.4.4 Shrnutí

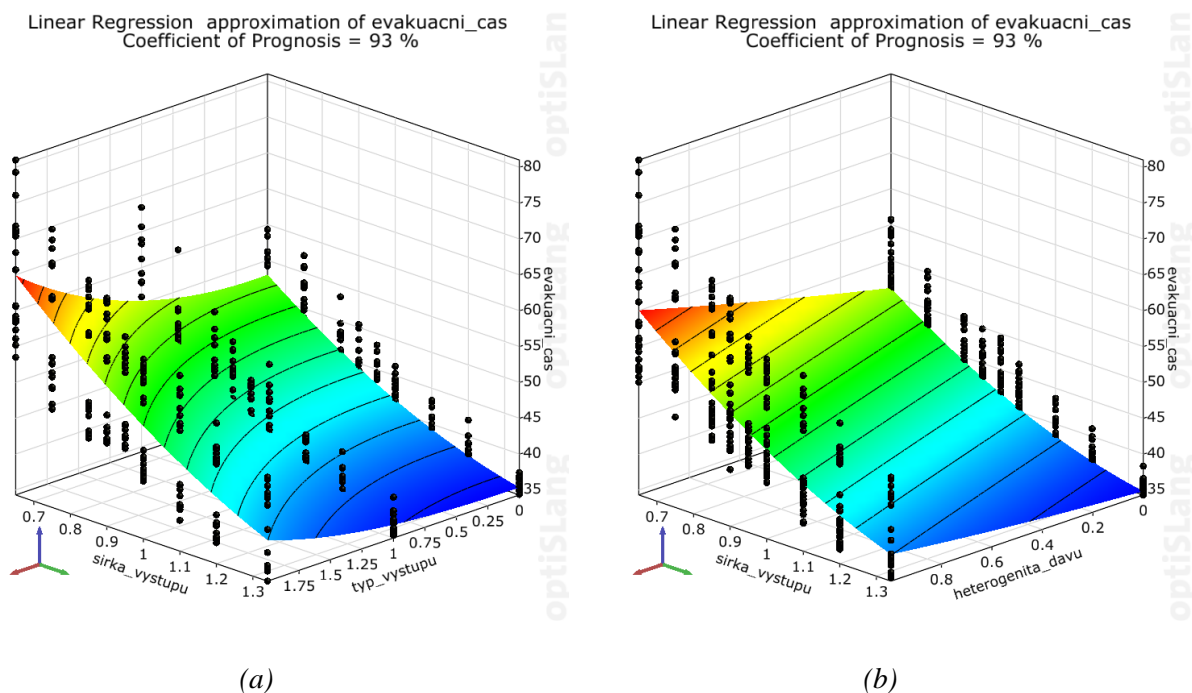
Uskutečněná citlivostní analýza základní modelové situace, analyzovala data získaná z validovaného modelu evakuace a evakuačního experimentu. Zkoumány byly předem vybrané parametry, kterými byla heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Bylo odhaleno, že největší vliv na celkovou dobu evakuace měla šířka výstupu, konkrétně se jednalo o omezování nástupního prostoru a vstupních dveří. Dále bylo při citlivostní analýze z hlediska konkrétního vstupního parametru zjištěno, že heterogenita davu a typ výstupu spolu výrazně spolupůsobí na celkový evakuační čas. Nicméně bylo také odhaleno, že množství analyzovaných dat výrazně ovlivňuje výsledky citlivostní analýzy, a proto bylo rozhodnuto o provedení podrobnější simulační studie, která je uvedena v následující podkapitole 3.5.

3.5 Citlivostní analýza modelové situace s jemnější škálou parametrů

Z výše uvedené citlivostní analýzy základní modelové situace vyplývá, že množství dat zásadně ovlivňuje získané výsledné citlivosti celkové doby evakuace na jednotlivé vstupní parametry. V této části je provedena podrobnější simulační studie, která má za cíl odhalit význam jemnější škály parametrů a množství běhů simulací, a to pomocí dalších evakuačních scénářů. Podkapitola je rozdělena na tři části, kde v části 3.5.1 je zkoumán vliv více evakuačních scénářů na výsledky citlivostní analýzy a je zde i citlivostní analýza rozšířeného modelu uvedena. V části 3.5.2 je pak provedena optimalizace modelové situace, která má za cíl zjednodušit citlivostní analýzu, především snížit množství dat, které je nutné analyzovat, a to při zachování přesnosti výsledků. Důvodem je citlivostní analýza dalších vstupních parametrů, která je uvedena v podkapitole 3.6 a vzhledem k velkému množství zkoumaných parametrů a tím i velkému množství dat by jí nebylo možné uskutečnit. V poslední části 3.5.3 je celá problematika shrnuta.

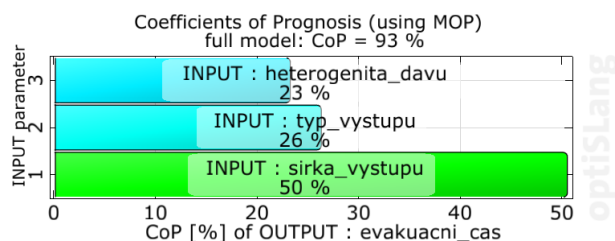
3.5.1 Citlivostní analýza modelu evakuace rozšířené o další evakuační scénáře

Nejprve byly do základní modelové situace doplněny evakuační scénáře s dalšími šířkami nástupního prostoru. Celkem tak bylo modelováno 9 šířek nástupního prostoru, které jsou uvedeny v tab. 8. Na obr. 40 jsou vidět vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech modelu rozšířeného o další šířky nástupního prostoru, které se od vizualizací modelu lineární regrese základní modelové situace příliš neliší (obr. 31).



obr. 40 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry (a) šířku výstupu a typ výstupu; (b) šířku výstupu a heterogenitu davu

Získané koeficienty prognózy na obr. 41, jsou rámcově podobné s koeficienty prognózy základního modelu a citlivost se nejvíce liší u šířky výstupu, která se snížila o 7 procentních bodů, což je doprovázeno zvýšením ostatních parametrů.



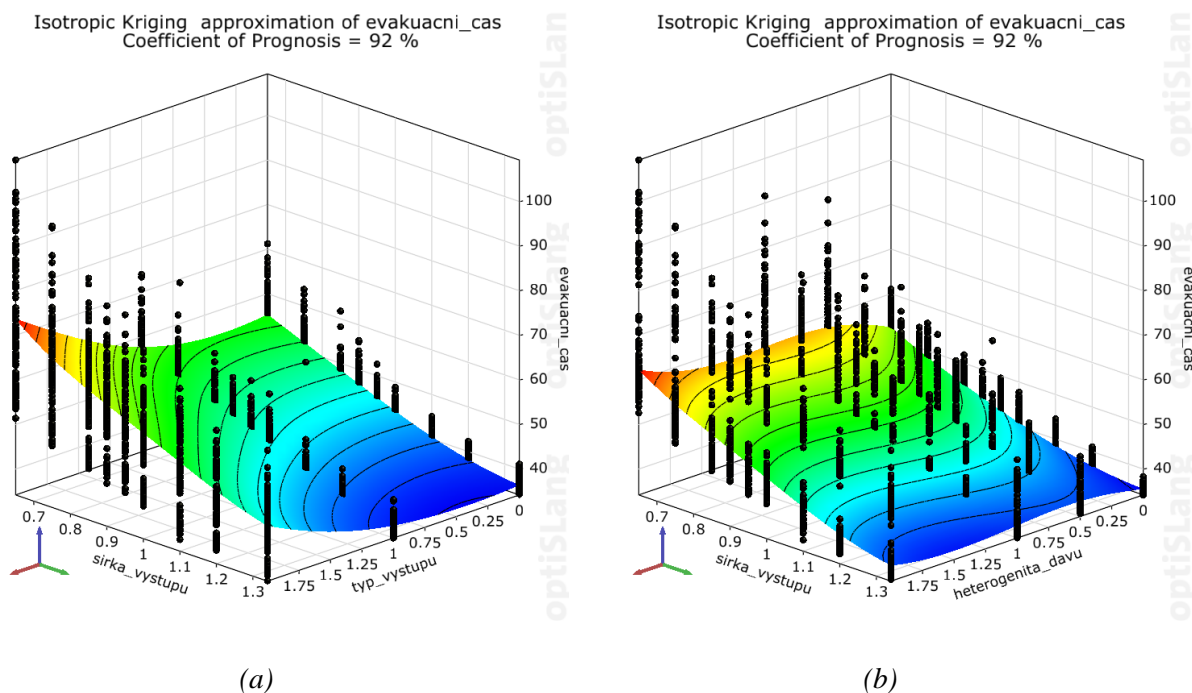
obr. 41 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, rozšířený model o další šířky nástupního prostoru

Následujícím krokem rozšiřování modelu evakuace o další evakuační scénáře bylo přidat více skupin osob o různém složení. Původní skupiny s homogenním a heterogenním složením osob byly ponechány a přidány byly dvě skupiny s heterogenním složením osob. Jednou byla skupina s polovičním počtem pohybově omezených osob, druhou pak skupina s dvojnásobným počtem pohybově omezených osob oproti původní heterogenní skupině. Jednotlivé hodnoty zkoumaných parametrů heterogenity davu a typu výstupu jsou společně s popisem uvedeny v tab. 8.

tab. 8 Popis hodnot vstupních parametrů heterogenity davu a typu výstupu

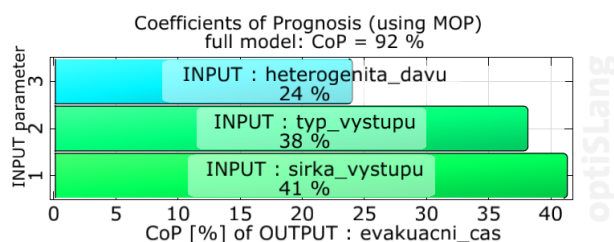
	hodnota v metamodelu	popis, hodnoty
heterogenita davu	0	homogenní skupina složená pouze ze zdatných osob
	0,5	heterogenní skupina s polovičním počtem méně zdatných osob na základě průzkumu [1]
	1	heterogenní skupina osob se složením na základě průzkumu [1]
	2	heterogenní skupina s dvojnásobným počtem méně zdatných osob na základě průzkumu [1]
typ výstupu	0	výstup z vlakové jednotky na nástupiště
	1	výstup z vlakové jednotky po schodišti
	2	výstup z vlakové jednotky na terén
šířka výstupu	0.65	650 mm
	0.75	750 mm
	0.85	850 mm
	0.9	900 mm
	0.95	950 mm
	1	1000 mm
	1.1	1100 mm
	1.2	1200 mm
1.34	1340 mm	

Na obr. 42 jsou vidět vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech modelu rozšířeného jak o další šířky nástupního prostoru, tak i o další skupiny osob o různém složení. Celkem bylo do metamodelu programu optiSLang zadáno 3240 evakuačních simulací, 108 scénářů po třiceti bžích simulace. Na obr. 42 (b) je patrné podrobnější vykreslení modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech, což je způsobeno vlivem více druhů skupin osob, vykreslení modelu lineární regrese tak není lineární jako v případě metamodelu s pouze homogenní a heterogenní skupinou osob (obr. 40 (a)).



obr. 42 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry (a) šířku výstupu a typ výstupu; (b) šířku výstupu a heterogenitu davu

Změně tvaru vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech odpovídají i získané koeficienty prognózy na obr. 43. Oproti výsledkům citlivostní analýzy základní modelové situace se výsledky rozšířeného modelu evakuace liší především ve vlivu šířky nástupního prostoru na celkový evakuační čas, který se snížil o 16 procentních bodů při porovnání se základním modelem s třiceti běhy simulace. Dále došlo ke zvýšení vlivu typu výstupu o 15 procentních bodů a vlivu heterogenity davu o 4 procentní body. Míra vzájemného spolupůsobení vstupních parametrů na výstup se téměř nezměnila. Zajímavé je, že se výsledky této citlivostní analýzy přiblížili výsledkům citlivostní analýzy evakuačního experimentu (obr. 38), přičemž došlo pouze k nárůstu vlivu heterogenity davu o 6 procentních bodů, typu výstupu o 4 procentní body a k poklesu vlivu šířky výstupu o 2 procentní body. Toto přiblížení výsledků citlivostních analýz nicméně nelze považovat za směrodatné z hlediska nedostatečného množství analyzovaných dat z evakuačního experimentu a s největší pravděpodobností se jedná pouze o náhodu.

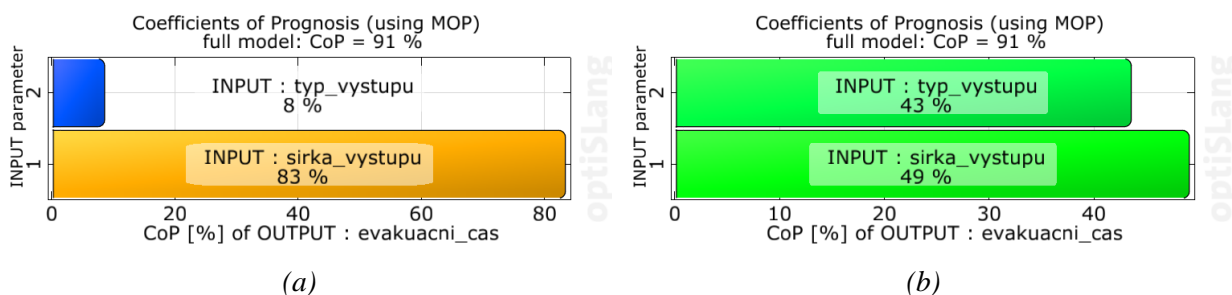


obr. 43 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, rozšířený model o další šířky nástupního prostoru a další skupiny osob

Rozšířený model evakuace o další evakuační scénáře, zejména o více druhů skupin osob, lze považovat za přesnější oproti původnímu validovanému modelu, ze kterého vychází, a to především z hlediska reálnějšího vykreslení vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech na obr. 42. Na základě toho bylo rozhodnuto provést citlivostní analýzu z pohledu jednotlivých vstupních parametrů v části 3.4.2 znovu a získat přesnější výsledky.

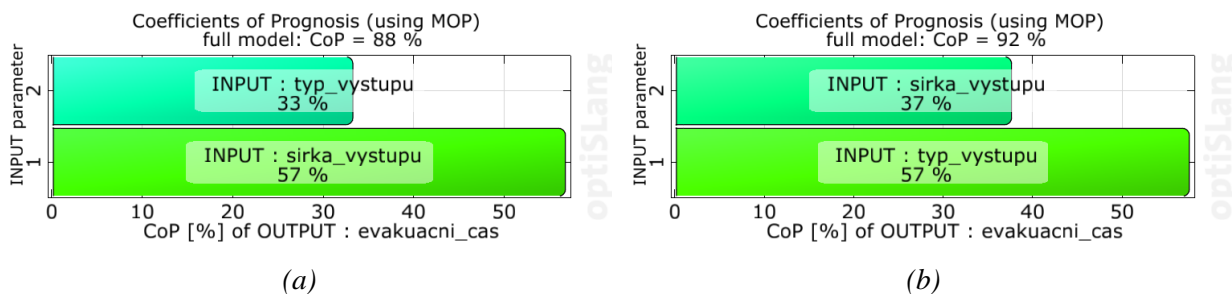
3.5.1.1 Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska heterogenity skupiny osob

Na obr. 44 jsou vidět koeficienty prognózy u rozšířeného modelu zvláště při evakuaci homogenní skupiny a heterogenní skupiny se složením na základě průzkumu, viz tab. 8. Oproti původním výsledkům ze základního modelu došlo díky zahrnutí více šířek do modelu k odhalení, že šířka výstupu má nižší vliv na celkový evakuační čas, a to o 4 procentní body u homogenní skupiny osob a 7 procentních bodů u heterogenní skupiny osob. V souvislosti s tím se změnil i vliv typu výstupu, a to tak, že došlo k nárůstu u homogenní skupiny osob o 3 procentní body a u heterogenní skupiny osob o 5 procentních bodů.



obr. 44 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob se složením na základě průzkumu

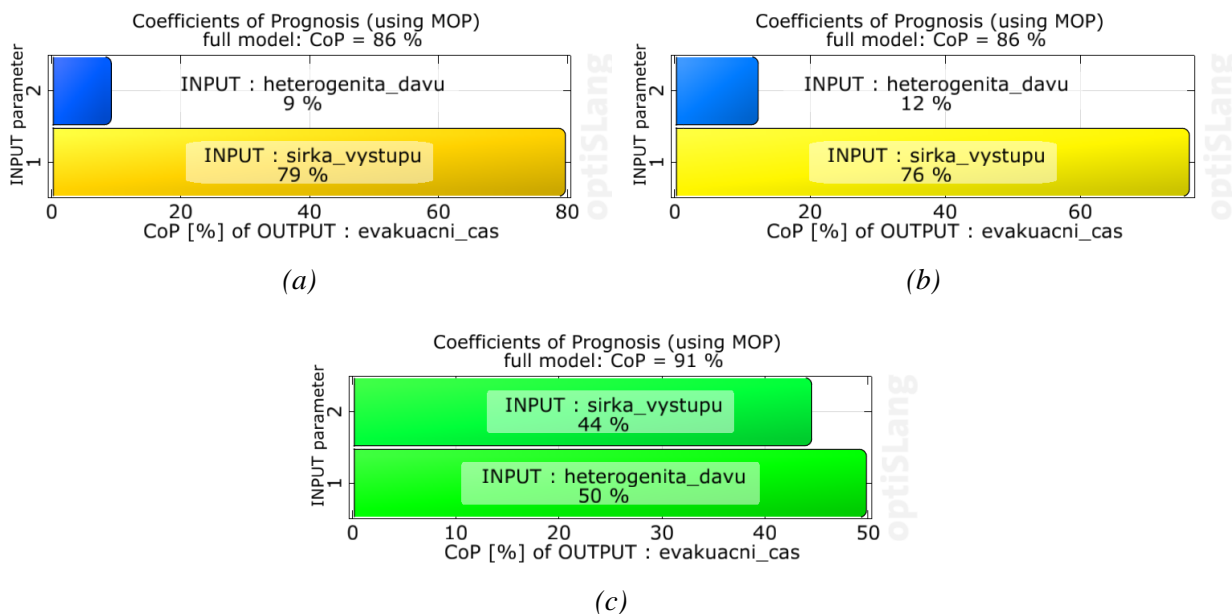
Pro porovnání jsou na obr. 45 uvedeny i koeficienty prognózy při evakuaci heterogenních skupin s polovičním a dvojnásobným počtem méně zdatných osob na základě průzkumu [1]. Jak je z výsledků na obr. 44 a obr. 45 patrné, tak s větším počtem méně zdatných osob roste význam parametru typu výstupu a klesá vliv šířky výstupu.



obr. 45 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) heterogenní skupiny osob s polovičním počtem méně zdatných osob; (b) heterogenní skupiny osob s dvojnásobným počtem méně zdatných osob

3.5.1.2 Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska typu výstupu

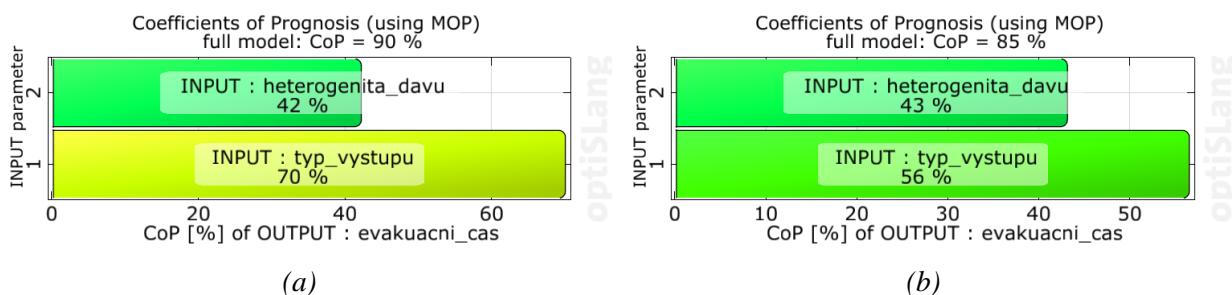
Dále je prověřen vliv heterogenity skupin osob a šířky nástupního prostoru u jednotlivých typů výstupů (výstup na nástupiště, po schodišti a na terén v úrovni kolejiště) na celkový evakuační čas (obr. 46). Oproti původním výsledkům ze základního modelu došlo k poklesu vlivu šířky výstupu a k nárůstu vlivu heterogenity davu. Největší rozdíl nastal u výstupu na terén, při kterém se vliv heterogenity davu zvýšil o 12 procentních bodů a stal se tak významnějším než šířka výstupu, která se snížila o 13 procentních bodů. Z této citlivostní analýzy vyplývá, že výše uvedený rostoucí vliv typu výstupu, který je závislý na rostoucím počtu méně zdatných osob v evakuované skupině je především způsoben výstupem na terén.



obr. 46 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) na nástupiště; (b) po schodišti; (c) na terén v úrovni kolejiště

3.5.1.3 Citlivostní analýza evakuačních scénářů z hlediska šířky nástupního prostoru

Přidání více skupin osob o různém složení do rozšířeného modelu způsobilo zvýšení koeficientu prognózy u metamodelů s nižšími šířkami výstupu, tedy ke zvýšení aproximace metamodelu oproti základnímu modelu. Pro ilustraci jsou uvedeny pouze koeficienty prognózy u evakuačních scénářů s šířkou výstupu 1340 mm a 650 mm, obr. 47. Se snižující se šířkou výstupu klesá vliv typu výstupu, což je způsobeno především klesajícím vzájemným spolupůsobením heterogenity davu a typu výstupu na celkový evakuační čas.



obr. 47 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci s šířkou nástupního prostoru
(a) 1340 mm; (b) 650 mm

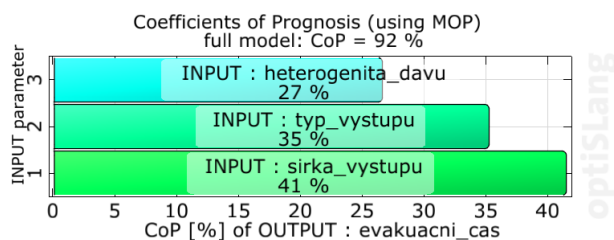
3.5.2 Citlivostní analýza modelu evakuace s přijatelnými evakuačními scénáři

Vzhledem k velkému množství zkoumaných parametrů a tím i velkému množství dat, které je třeba v části 3.6 analyzovat, bylo rozhodnuto optimalizovat množství zkoumaných evakuačních scénářů a běhů simulací, a to při zachování přesnosti výsledků. Z hlediska typů výstupů, které mohou s největší pravděpodobností při nouzové situaci u jednotky EPJ471 nastat bylo rozhodnuto v rámci zjednodušení výstup po schodišti z vloženého vozu dále zanedbat. Dále bylo odzkoušeno několik variant a nezbytným pro zachování přesnosti výsledků se ukázalo modelování všech čtyř typů složení skupin a alespoň čtyř šířek nástupního prostoru. Pro ověření získání výsledků, které budou odpovídat předešlému modelu byla uskutečněna citlivostní analýza této optimalizované modelové situace, přehledný seznam zkoumaných parametrů a jejich hodnot je uveden v tab. 9.

tab. 9 Hodnoty vstupních parametrů optimalizované modelové situace

zkoumaný parametr	hodnoty
heterogenita davu	homogenní skupina složená pouze ze zdatných osob
	heterogenní skupina s polovičním počtem méně zdatných osob
	heterogenní skupina osob
	heterogenní skupina s dvojnásobným počtem méně zdatných osob
šířka nástupního prostoru	700 mm
	900 mm
	1100 mm
	1340 mm
typ výstupu	výstup z vlakové jednotky na nástupiště
	výstup z vlakové jednotky na terén

Celkem se jednalo o 32 evakuačních scénářů s deseti běhy simulace, celkem tedy bylo analyzováno 320 simulací evakuace. Z porovnání výsledných koeficientů prognózy na obr. 43 a obr. 48 vyplývá, že lze dosáhnout stejných výsledků citlivostní analýzy i při menším množství analyzovaných dat při zachování dostatečně jemné škály parametrů. Jediný rozdíl je, že parametr heterogenity davu vzrostl na úkor parametru typu výstupu o 3 procentní body, což lze přisoudit vynechání evakuačních scénářů s výstupem po schodišti. U vstupního parametru šířky nástupního prostoru nedošlo oproti rozšířenému modelu ke změně.



obr. 48 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, model s přijatelným množstvím vstupních dat

3.5.3 Shrnutí

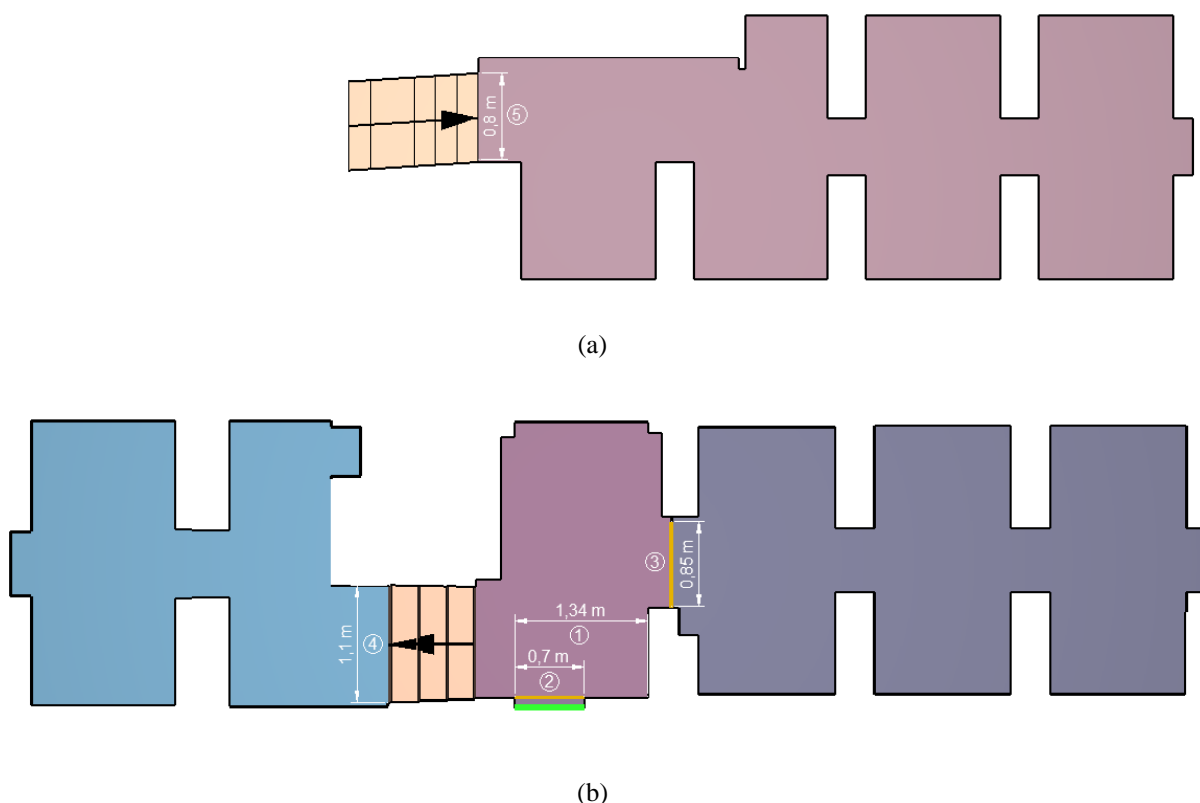
Bylo odhaleno, že nejpodstatnější pro získání relevantních výsledků citlivostní analýzy modelu evakuace je dostatečně jemná škála hodnot zkoumaných parametrů. Jako nezbytné se pro pochopení vlivu heterogenity davu ukázalo modelování více skupin osob o různém složení. Dále bylo prokázáno, že lze dosáhnout stejných výsledků citlivostní analýzy i při menším množství analyzovaných evakuačních scénářů a jejich běhů a tím ušetřit značné množství výpočetního času, což umožňuje zkoumat i jiné vstupní parametry, viz část 3.6.

3.6 Citlivostní analýza dalších parametrů modelu evakuace

Třetí částí citlivostní analýzy modelu evakuace je analýza dalších parametrů, které při evakuačním experimentu nebylo možné zkoumat. K původním zkoumaným vstupním parametrům byly vybrány další geometrické parametry vozu, které by mohly ovlivnit celkový evakuační čas z vlakové jednotky. Při této citlivostní analýze byly nastaveny dva typy výstupů (na nástupiště a na terén), čtyři skupiny osob o různém složení (tab. 9) a dále geometrické parametry, které jsou uvedeny společně s jejich rozptylem hodnot v tab. 10, a které jsou patrné i z obr. 49. Celkem bylo analyzováno 2800 simulací evakuace, 280 evakuačních scénářů po 10 běžích.

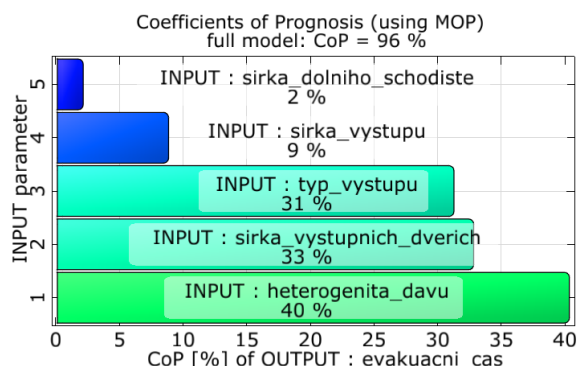
tab. 10 Zkoumané vstupní geometrické parametry a jejich hodnoty

označení	zkoumané geometrické parametry	hodnoty [mm]
1	šířka výstupu	700, 900, 1100, 1340
2	šířka výstupních dveří	700, 900, 1100, 1340
3	šířka vnitřních dveří	650, 850
4	šířka dolního schodiště	800, 1100
5	šířka horního schodiště	800, 1000



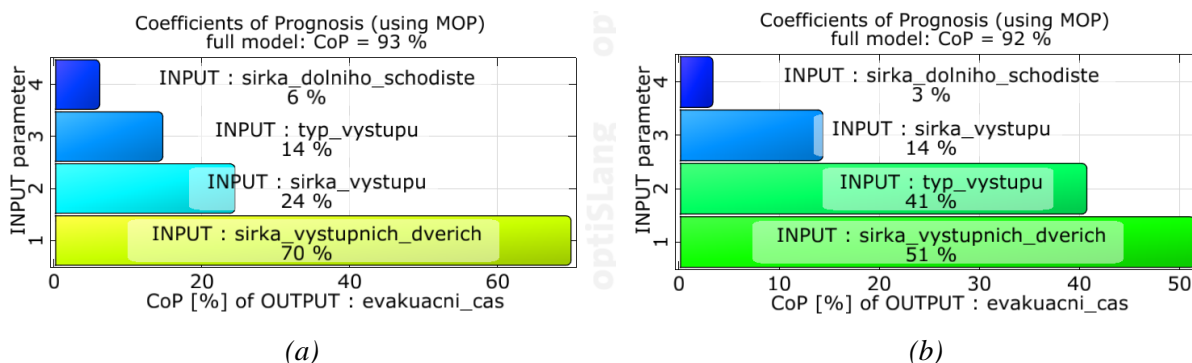
obr. 49 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder, vyznačené měněné geometrické parametry - (a) spodní podlaží, (b) horní podlaží

Výsledky citlivostní analýzy ukázaly, že geometrický parametr šířky vnitřních dveří a šířky horního schodiště nemá na celkový evakuační čas vliv, který by bylo možné změřit. Podobně má šířka dolního schodiště velmi nízký vliv oproti dalším zkoumaným geometrickým parametrům (obr. 50).



obr. 50 Koeficienty prognózy: analýza dalších parametrů nad rámec validovaného modelu, celý model

Velkou změnu vlivu heterogenity davu na celkový evakuační čas oproti předešlým analýzám způsobilo přidání dalších měněných geometrických parametrů vlakového vozu. Tyto geometrické parametry mají pro různé složení skupiny osob odlišný vliv a výrazně tak spolupůsobí s heterogenitou davu. To potvrzují i výsledky při evakuaci homogenní a heterogenní skupiny osob citlivostní analýzy dalších parametrů nad rámec validovaného modelu, kde je nejen patrný výrazný rozdíl ve vlivu typu výstupu, ale i rozdílný vliv šířky dolního schodiště (obr. 51). Stejně tomu tak bylo i u parametrů šířky vnitřních dveří a šířky horního schodiště, u kterých sice nebylo možné změřit jejich vliv, ale v souvislosti se složením skupiny osob ovlivnily celkový evakuační čas.



obr. 51 Koeficienty prognózy: analýza dalších parametrů nad rámec validovaného modelu při evakuaci
(a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob

Pro zpřesnění výsledků citlivostní analýzy byly provedeny simulace evakuace celkem čtyř různých skupin osob s rozdílným složením z hlediska věku a pohybové zdatnosti cestujících. Nicméně směrodatným ukazatelem vlivu geometrických parametrů vlakového vozu jsou výsledky citlivostní analýzy heterogenní skupiny osob dle průzkumu složení cestujících příměstskými vlaky v ČR [1], (obr. 51 (b)).

3.7 Shrnutí a diskuze citlivostní analýzy modelů evakuace

V prvním kroku citlivostní analýzy modelu evakuace byla analyzována data získaná z validovaného modelu evakuace a zkoumány byly předem vybrané parametry, kterými byla heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Bylo odhaleno, že heterogenita davu a typ výstupu spolu výrazně spolupůsobí na celkový evakuační čas, přičemž největší vliv na celkovou dobu evakuace měl rozměr nástupního prostoru. Díky analýze dat získaných z evakuačního experimentu však bylo následně také odhaleno, že množství analyzovaných dat zásadně ovlivňuje výsledky citlivostní analýzy, a proto bylo rozhodnuto o dalším výzkumu. V druhém kroku byl model evakuace pro zpřesnění predikce citlivosti postupně rozšiřován o další evakuační scénáře a dále byl také pozorován i vliv množství běhů simulací jednotlivých evakuačních scénářů. Podrobnější výzkum ukázal, že pro získání relevantních výsledků je nejvíce podstatný počet evakuačních scénářů, resp. dostatečně jemná škála hodnot zkoumaných vstupních parametrů. Jako nezbytné se pro pochopení vlivu heterogenity davu ukázalo modelování více skupin osob o různém složení. Dále bylo prokázáno, že lze dosáhnout stejných výsledků citlivostní analýzy i při menším množství analyzovaných dat při zachování dostatečně jemné škály parametrů a tím ušetřit značné množství výpočetního času, což umožnilo zkoumat i další vstupní parametry. V třetím kroku byly zkoumány geometrické parametry interiéru vlakového vozu, které by mohly ovlivnit plynulost a celkový čas evakuace. Bylo odhaleno, že geometrický parametr šířky vnitřních dveří a šířky horního schodiště nemá na celkový evakuační čas vliv, který by bylo možné změřit. Podobně měla šířka dolního schodiště velmi nízký vliv na rozdíl od dalších zkoumaných geometrických parametrů, oproti tomu se opět složení skupiny cestujících ukázalo jako významné.

Díky provedenému výzkumu bylo zjištěno, že složení skupiny osob z hlediska věku a pohybové zdatnosti cestujících zásadně ovlivňuje výsledky citlivostní analýzy geometrických parametrů vlakového vozu a typ výstupu z vlakového vozu. Z toho vyplývá, že i při zkoumání pouze geometrických parametrů za účelem optimalizace interiéru vlakových vozů je nezbytné uvažovat různé složení skupiny cestujících a zaměřit se na správnou volbu vstupních dat.

4 Závěr

Diplomová práce se zabývala citlivostní analýzou v požární bezpečnosti, konkrétně citlivostní analýzou modelů evakuace osob z vlakových vozů. Jejím hlavním cílem bylo ve vybraném evakuačním modelu analyzovat nouzový výstup z vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 CityElefant, vyhodnotit výsledky za pomoci citlivostní analýzy modelu evakuace a odhalit tak významné vstupní parametry, které mají vliv na průběh a celkový čas evakuace.

V teoretické části práce jsou shrnuty dřívější významné výzkumy, ale i moderní současné metody a aplikace citlivostní analýzy. Z matematického modelování evakuace jsou zde uvedeny některé již provedené počítačové simulace evakuace z vlakových vozů. Literární rešerše ukázala, že oproti jiným odvětvím v požární bezpečnosti je citlivostní analýza evakuačních modelů vlaků celkem opomíjená. Přitom v modelu evakuace vlakového vozu je velké množství vstupních parametrů a nejistot, které souvisí s omezeným prostorem vlakového vozu, jenž se může nacházet v různém prostředí (např. volný terén, tunel, most). Současně železniční dopravou cestují osoby všech věkových kategorií, včetně osob s omezeným pohybem. Aplikace citlivostní analýzy v této oblasti tedy má význam a může přinést zajímavé poznatky. Dále bylo představeno velké množství parametrů, které mohou být uvažovány jako vstupy do modelů evakuace vlaku. Získávání relevantních dat těchto vstupních parametrů může být nicméně obtížné. Nabízí se sice možnost převzít vstupní parametry, které vycházejí z evakuace budov, ale například šířky chodeb v budovách jsou mnohem větší než šířky uliček ve vlacích a výška stupně schodů je nižší než v interiéru vozu, u schůdků na nástupiště či terén po stranách vozu. Proto evakuační toky osob, které vycházejí z evakuace budov, nemohou odrážet skutečné evakuační podmínky v osobních kolejových vozidlech. Celý proces získávání relevantních dat vstupních parametrů je možné zefektivnit pomocí nástrojů citlivostní analýzy. Díky odhalení vlivu vstupních parametrů na sledovaný výstupní parametr je možné zaměřit se především na ty významné, a to jak při modelování, tak při získávání experimentálních dat, což povede ke zpřesnění výsledků simulace.

V rámci praktické části této práce a související diplomové práce [1] byl realizován experiment nouzového výstupu z vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 CityElefant, za podpory Fakulty stavební ČVUT v Praze a VÚKV a.s.. Uskutečněný evakuační experiment byl organizovaný bez soutěžních podmínek se zastoupením figurantů všech věkových kategorií. Figuranti byli informováni o průběhu experimentu a jejich chování bylo předepsáno. V průběhu bylo realizováno několik evakuačních scénářů sestavených na základě měněných parametrů, kterými byly: heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Evakuační experiment byl úspěšný a získaná data jsou zpracována v rámci diplomové práce [1]. Tyto zpracované výsledky byly použity pro vytvoření modelu evakuace vloženého vozu řady 071 jednotky EPJ471 v programu Pathfinder, k jeho vyhodnocení, validaci a provedení následných citlivostních analýz, které popisovaly vliv předem vybraných parametrů na celkový čas evakuace.

Závěry vyplývající z matematického modelování konkrétní modelové situace evakuace osob z vlakového vozu.

Modelová situace vychází z uskutečněného evakuačního experimentu a získaná experimentální data byla použita nejen jako vstupní parametry do modelu evakuace, ale i pro jeho validaci. Modelováno bylo celkem 30 evakuačních scénářů, při kterých byly vzájemně kombinovány měněné parametry, těmi byly: heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Z uskutečněného experimentu a matematické simulace bylo zjištěno, že při velkých šířkách nástupního prostoru (do 900 mm) a fyzicky nenáročných typech výstupu z vlakového vozu (na nástupiště a po schodišti) jsou výsledné evakuační časy homogenní skupiny osob a heterogenní skupiny osob srovnatelné. Z toho vyplývá, že je možné simulovat evakuaci z vlakového vozu v programu Pathfinder i bez uvažování méně zdatných a pohybově omezených osob, ale to pouze při několika konkrétních situacích. V ostatních případech se vliv složení cestujících z hlediska věku a pohybové zdatnosti ukázal jako významný.

Závěry vyplývající z provedených citlivostních analýz

Nejprve byla provedena citlivostní analýza, při které byly analyzovány data získaná z validovaného modelu evakuace. Zkoumány byly předem vybrané parametry, kterými byla heterogenita davu, šířka výstupu a typ výstupu. Bylo odhaleno, že heterogenita davu a typ výstupu spolu výrazně spolupůsobí na celkový evakuační čas, přičemž největší vliv na celkovou dobu evakuace měl rozměr nástupního prostoru. Pro zpřesnění predikce citlivosti byl model evakuace dále postupně rozšiřován o další evakuační scénáře a množství běhů simulací. Podrobnější výzkum ukázal, že pro získání relevantních výsledků je nejvíce podstatný počet evakuačních scénářů, resp. dostatečně jemná škála hodnot zkoumaných vstupních parametrů. Jako nezbytné se pro pochopení vlivu heterogenity davu ukázalo modelování více skupin osob o různém složení. Dále bylo prokázáno, že lze dosáhnout stejných výsledků citlivostní analýzy i při menším množství běhů simulací při zachování dostatečně jemné škály parametrů. Což umožnilo zkoumat další geometrické parametry interiéru vlakového vozu, které by mohli ovlivnit plynulost a celkový čas evakuace. Bylo odhaleno, že geometrický parametr šířky vnitřních dveří a šířky horního schodiště nemá na celkový evakuační čas vliv, který by bylo možné změřit. Podobně měla šířka dolního schodiště velmi nízký vliv na rozdíl od dalších zkoumaných geometrických parametrů, oproti tomu se opět složení skupiny cestujících ukázalo jako významné.

Závěrem lze konstatovat, že složení skupiny osob z hlediska věku a pohybové zdatnosti cestujících zásadně ovlivňuje výsledky citlivostní analýzy geometrických parametrů vlakového vozu a typ výstupu z vlakového vozu. Z toho vyplývá, že i při zkoumání pouze geometrických parametrů za účelem optimalizace interiéru vlakových vozů je nezbytné uvažovat různé složení skupiny cestujících a zaměřit se na správnou volbu vstupních dat. Směrodatným ukazatelem vlivu geometrických parametrů vlakového vozu mohou být výsledky citlivostní analýzy heterogenní skupiny osob dle průzkumu [1], přičemž analyzované výsledky odpovídají složení cestujících příměstskými vlaky v ČR.

Seznam obrázků

obr. 1	Třívozová elektrická jednotka řady 471 (CityElefant).....	29
obr. 2	Půdorys vložené jednotky řady 071 vozové jednotky EPJ471.....	29
obr. 3	Skupina figurantů se složením (a) heterogenním; (b) homogenním.	31
obr. 4	Zábrana omezující nástupní prostor vložené jednotky na 750 mm.....	32
obr. 5	Výstup z jednotky na pódium simulující nástupiště.....	33
obr. 6	Výstup z jednotky (a) po schodišti; (b) na terén.....	33
obr. 7	Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – výstup na nástupiště.....	36
obr. 8	Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – výstup po schodišti	37
obr. 9	Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – výstup na terén v úrovni kolejiště.....	38
obr. 10	Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – homogenní skupina osob ..	39
obr. 11	Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder – heterogenní skupina osob .	40
obr. 27	Jednoduchá studie konvergence pro evakuaci: (a) homogenní skupiny osob na terén, při šířce výstupu 650 mm (b) heterogenní skupiny osob na nástupiště, při šířce výstupu 1100 mm.	41
obr. 28	Průběhy odchylek průměrné doby evakuace předešlých běhů vybraných evakuačních scénářů	42
obr. 12	Výstup na nástupiště, šířka dveří 1340 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	43
obr. 13	Výstup na nástupiště, šířka dveří 1100 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	44
obr. 14	Výstup na nástupiště, šířka dveří 900 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	44
obr. 15	Výstup na nástupiště, šířka dveří 750 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	45
obr. 16	Výstup na nástupiště, šířka dveří 650 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	46
obr. 17	Výstup po schodišti, šířka dveří 1340 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	47
obr. 18	Výstup po schodišti, šířka dveří 1100 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	47
obr. 19	Výstup po schodišti, šířka dveří 900 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	48
obr. 20	Výstup po schodišti, šířka dveří 750 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	48

obr. 21 Výstup po schodišti, šířka dveří 650 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	49
obr. 22 Výstup na terén, šířka dveří 1340 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	50
obr. 23 Výstup na terén, šířka dveří 1100 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina	50
obr. 24 Výstup na terén, šířka dveří 900 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina..	51
obr. 25 Výstup na terén, šířka dveří 750 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina..	52
obr. 26 Výstup na terén, šířka dveří 650 mm (a) homogenní skupina; (b) heterogenní skupina..	52
obr. 29 Porovnání křivky evakuovaných osob v čase získané z evakuačního experimentu a zprůměrované křivky 30 běhů matematické simulace (a) homogenní skupina osob, výstup na nástupiště, šířka výstupu 1100 mm; (b) heterogenní skupina osob, výstup na nástupiště, šířka výstupu 900 mm.....	53
obr. 30 Porovnání křivky evakuovaných osob v čase získané z evakuačního experimentu a zprůměrované křivky 30 běhů matematické simulace (a) homogenní skupina osob, výstup na terén, šířka výstupu 750 mm; (b) heterogenní skupina osob, výstup na terén, šířka výstupu 1340 mm	54
obr. 31 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry (a) šířku výstupu a typ výstupu; (b) šířku výstupu a heterogenitu davu	57
obr. 32 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, 10 běhů simulací	57
obr. 33 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, (a) jeden běh simulace; (b) 30 běhů simulace	58
obr. 34 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry typ výstupu a šířku výstupu: (a) analýza homogenní skupiny osob (b) analýza heterogenní skupiny osob	59
obr. 35 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob.....	59
obr. 36 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) na nástupiště; (b) po schodišti; (c) na terén v úrovni kolejiště	60
obr. 37 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci s šířkou nástupního prostoru (a) 1340 mm; (b) 650 mm.....	61
obr. 38 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, evakuační experiment	61
obr. 39 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuačním experimentu (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob.....	61
obr. 40 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry (a) šířku výstupu a typ výstupu; (b) šířku výstupu a heterogenitu davu.....	63
obr. 41 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, rozšířený model o další šířky nástupního prostoru	64

obr. 42 Vizualizace modelu lineární regrese závislosti evakuačního času na vstupních parametrech – řez modelem ukazující parametry (a) šířku výstupu a typ výstupu; (b) šířku výstupu a heterogenitu davu.....	65
obr. 43 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, rozšířený model o další šířky nástupního prostoru a další skupiny osob.....	66
obr. 44 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob se složením na základě průzkumu.....	66
obr. 45 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) heterogenní skupiny osob s polovičním počtem méně zdatných osob; (b) heterogenní skupiny osob s dvojnásobným počtem méně zdatných osob.....	67
obr. 46 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci (a) na nástupiště; (b) po schodišti; (c) na terén v úrovni kolejiště	67
obr. 47 Koeficienty prognózy: citlivost parametrů při evakuaci s šířkou nástupního prostoru (a) 1340 mm; (b) 650 mm.....	68
obr. 48 Koeficienty prognózy: analýza všech parametrů, model s přijatelným množstvím vstupních dat.....	69
obr. 49 Vizualizace modelovaného prostoru programu Pathfinder, vyznačené měněné geometrické parametry - (a) spodní podlaží, (b) horní podlaží	70
obr. 50 Koeficienty prognózy: analýza dalších parametrů nad rámec validovaného modelu, celý model	71
obr. 51 Koeficienty prognózy: analýza dalších parametrů nad rámec validovaného modelu při evakuaci (a) homogenní skupiny osob; (b) heterogenní skupiny osob.....	71
obr. 52 Vizualizace průběhu evakuace pomocí evakuačního modelu Pathfinder – evakuace na nástupiště, šířka nástupního prostoru 650 mm, homogenní skupina osob.....	82
obr. 53 Vizualizace průběhu evakuace pomocí evakuačního modelu Pathfinder – evakuace na schodiště, šířka nástupního prostoru 1200 mm, heterogenní skupina osob.....	82
obr. 54 Vizualizace průběhu evakuace pomocí evakuačního modelu Pathfinder – evakuace na terén, šířka nástupního prostoru 1200 mm, heterogenní skupina osob.....	83

Seznam tabulek

tab. 1 Potenciální vstupní data pro výpočet výstupu z osobního vlaku; převzato a upraveno z [19]	20
tab. 2 Potenciální vstupní data pro hydraulické modely a modely s individuálním pohybem; převzato a upraveno z [19].....	22
tab. 3 Zastoupení osob v jednotlivých scénářích (převzato a upraveno z [23]).....	24
tab. 4 Pořadí evakuačních scénářů – běhy a, b probíhaly současně, každý v jedné polovině vozu	30
tab. 5 Zastoupení osob v jednotlivých skupinách	38
tab. 6 Normálové rozdělení rychlostí zdatných osob ve věku od 19 do 53 let z evakuačního experimentu	39
tab. 7 Vstupní parametry agentů heterogenní skupiny	40
tab. 8 Popis hodnot vstupních parametrů heterogenity davu a typu výstupu	64
tab. 9 Hodnoty vstupních parametrů optimalizované modelové situace	68
tab. 10 Zkoumané vstupní geometrické parametry a jejich hodnoty	70

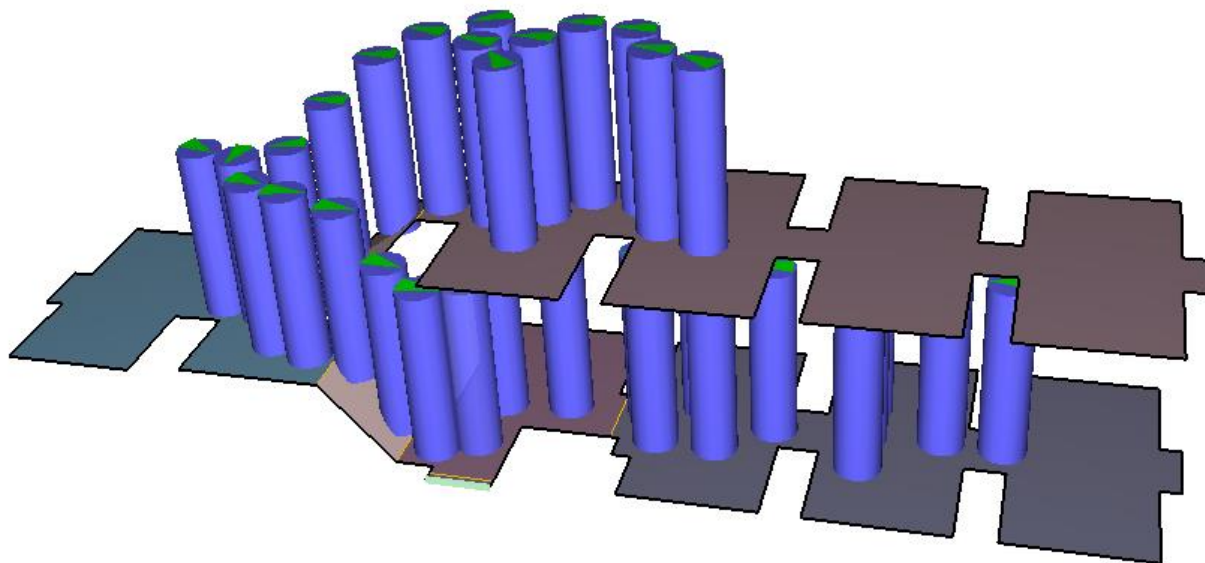
Literatura

- [1] PEŠKOVÁ, Veronika. *Hodnocení evakuace osob z vlakového vozu CityElefant*. B.m.: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. 2019
- [2] LI, Li, Ling Ling WEI, Michael KINSEY a Allen SUN. HSTEAM – High Speed Train Evacuation Analysis Methodology. *Procedia Engineering* [online]. 2018, **211**, 2017 8th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (ICFSFPE 2017), 18–27. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.12.133
- [3] SALTELLI, Andrea, Marco RATTO, Terry ANDRES, Francesca CAMPOLONGO, Jessica CARIBONI, Debora GATELLI, Michaela SAISANA a Stefano TARANTOLA. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. B.m.: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-72517-7.
- [4] SALTELLI, Andrea, Stefano TARANTOLA, Francesca CAMPOLONGO a Marco RATTO. *Sensitivity Analysis in Practice* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2002 [vid. 2018-05-11]. ISBN 978-0-470-87093-8. Dostupné z: doi:10.1002/0470870958
- [5] SALTELLI, Andrea. Sensitivity analysis: Could better methods be used? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 1999, **104**(D3), 3789–3793. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/1998JD100042
- [6] SUARD, S., S. HOSTIKKA a J. BACCOU. Sensitivity analysis of fire models using a fractional factorial design. *Fire Safety Journal* [online]. 2013, **62**, Special Issue on PRISME – Fire Safety in Nuclear Facilities, 115–124. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2013.01.031
- [7] NDUBIZU, C. C., D. E. RAMAKER, P. A. TATEM a F. W. WILLIAMS. A model of freely burning pool fires. *Combustion science and technology*. 1983, **31**(5–6), 233–247.
- [8] FU, Zhuman a Weicheng FAN. A Zone-type Model for a Building Fire and Its Sensitivity Analysis. *Fire and Materials* [online]. 1996, **20**(5), 215–224. ISSN 1099-1018. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1099-1018(199609)20:5<215::AID-FAM575>3.0.CO;2-M
- [9] BUKOWSKI, Richard W., Richard D. PEACOCK a Walter W. JONES. Sensitivity Examination of the airEXODUS Aircraft Evacuation Simulation Model. *NIST* [online]. 1998 [vid. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/publications/sensitivity-examination-air Exodus-aircraft-evacuation-simulation-model>
- [10] PEACOCK, Richard D., Paul A. RENEKE, C. Lynn FORNEY a Michael M. KOSTREVA. Issues in evaluation of complex fire models. *Fire Safety Journal* [online]. 1998, **30**(2), 103–136. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-7112(97)00061-1
- [11] WONG, M. B. a J. I. GHOJEL. Sensitivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural steel components. *Fire Safety Journal* [online]. 2003, **38**(2), 187–201. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/S0379-7112(02)00057-7

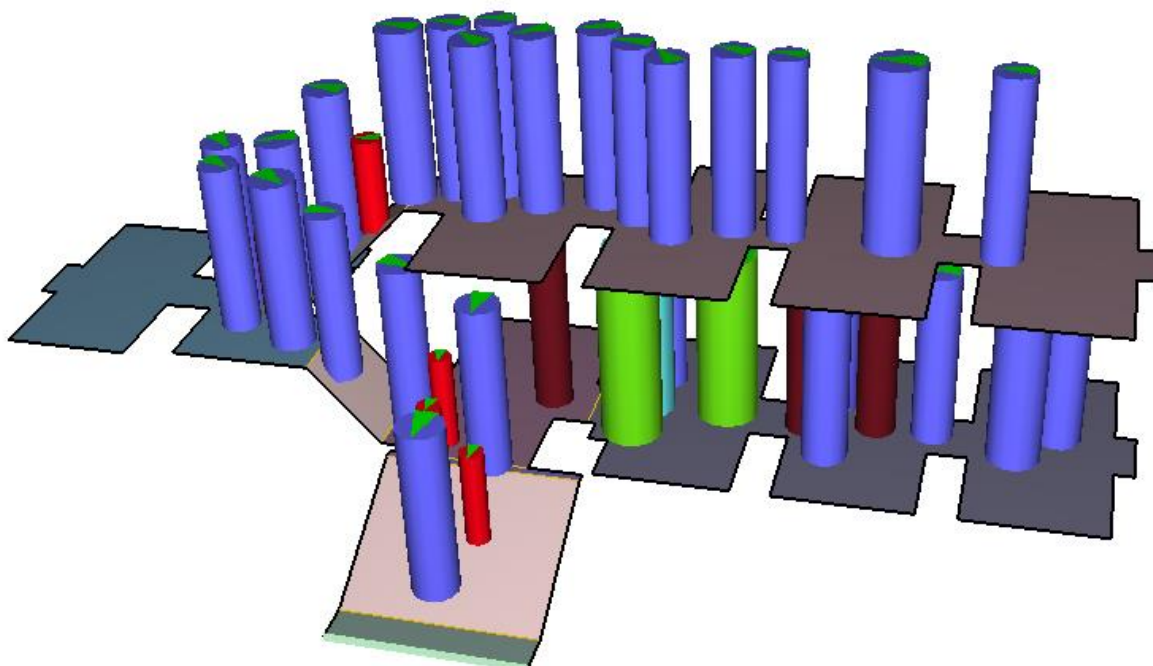
-
- [12] HASOFER, A. M. Modern sensitivity analysis of the CESARE-Risk computer fire model. *Fire Safety Journal* [online]. 2009, **44**(3), 330–338. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2008.07.007
- [13] SUARD, S., C. LAPUERTA, A. KAISS a B. PORTERIE. Sensitivity Analysis of a Fire Field Model in the Case of a Large-Scale Compartment Fire Scenario. *Numerical Heat Transfer: Part A -- Applications* [online]. 2013, **63**(12), 879–905. ISSN 10407782. Dostupné z: doi:10.1080/10407782.2012.725010
- [14] DUIVES, Dorine C., Winnie DAAMEN a Serge P. HOOGENDOORN. Continuum modelling of pedestrian flows — Part 2: Sensitivity analysis featuring crowd movement phenomena. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2016, **447**, 36–48. ISSN 0378-4371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2015.11.025
- [15] HOOGENDOORN, Serge P., Femke L. M. VAN WAGENINGEN-KESSELS, Winnie DAAMEN a Dorine C. DUIVES. Continuum modelling of pedestrian flows: From microscopic principles to self-organised macroscopic phenomena. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* [online]. 2014, **416**, 684–694. ISSN 0378-4371. Dostupné z: doi:10.1016/j.physa.2014.07.050
- [16] YAN, Xu, Huang HAI-JUN a Yong GUI. Modified Static Floor Field and Exit Choice for Pedestrian Evacuation. *Chinese Physics Letters* [online]. 2012, **29**(8), 080502. ISSN 0256-307X. Dostupné z: doi:10.1088/0256-307X/29/8/080502
- [17] MAO, Zhanli, Honglin MU, Huahua XIAO, Jinhua SUN a Lijing GAO. Reliability Analysis of Occupant Safety Evacuation in Public Assembly Occupancies. *Procedia Engineering* [online]. 2013, **62**, 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 493–500. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.08.092
- [18] DE SANCTIS, Gianluca a Mario FONTANA. Risk-based optimisation of fire safety egress provisions based on the LQI acceptance criterion. *Reliability Engineering & System Safety* [online]. 2016, **152**, 339–350. ISSN 0951-8320. Dostupné z: doi:10.1016/j.ress.2016.04.001
- [19] MARKOS, Stephanie H. a John K. POLLARD. *Passenger train emergency systems: review of egress variables and egress simulation models*. B.m.: United States. Federal Railroad Administration. Office of Research and Development. 2013.
- [20] GWYNNE, Steven MV a Eric R. ROSENBAUM. Employing the hydraulic model in assessing emergency movement. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. B.m.: Springer, 2016, s. 2115–2151.
- [21] ALONSO, Virginia, Orlando V. ABREU, Arturo CUESTA a Delfin SILIÓ. A New Approach for Modelling Passenger Trains Evacuation Procedures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [online]. 2014, **160**, XI Congreso de Ingenieria del Transporte (CIT 2014), 284–293. ISSN 1877-0428. Dostupné z: doi:10.1016/j.sbspro.2014.12.140
- [22] CAPOTE, Jorge A., Daniel ALVEAR, Orlando ABREU, Arturo CUESTA a Virginia ALONSO. A Stochastic Approach for Simulating Human Behaviour During Evacuation Process in Passenger Trains. *Fire Technology* [online]. 2012, **48**(4), 911–925. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-012-0251-3
-

-
- [23] KINDLER, C., J.G. SØRENSEN a A.S. DEDERICHS. Evacuation of mixed populations from trains on bridges. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability*. 2012, 1573–1579. ISSN 9780415621243.
- [24] NILSSON, D. a P. KANGEDAL. *Fire safety on intercity and interregional multiple unit trains*. B.m., 2002. PhD Thesis. Master Thesis 5117, Department in Fire Safety Engineering, Lund University.
- [25] KLÜGL, Franziska, Georg KLUBERTANZ a Guido RINDSFÜSER. Agent-Based Pedestrian Simulation of Train Evacuation Integrating Environmental Data. In: Bärbel MERTSCHING, Marcus HUND a Zaheer AZIZ, ed. *KI 2009: Advances in Artificial Intelligence*. B.m.: Springer Berlin Heidelberg, 2009, s. 631–638. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-642-04617-9.
- [26] GALEA, R. E., D. BLACKSHIELDS, P. LAWRENCE, K. FINNEY a D. COONEY. The Development and Validation of a Rail Car Evacuation Model. In: *Proceedings of the 13th International Fire Science & Engineering Conference INTERFLAM*. 2013, s. 1013–1034.
- [27] GALEA, E. R., D. BLACKSHIELDS, K. M. FINNEY a D. P. COONEY. *Passenger train emergency systems: development of prototype railEXODUS software for US passenger rail car egress*. B.m.: United States. Federal Railroad Administration. 2014.
- [28] KOŠŤÁK, David. *Analýza evakuace osob z železničních kolejových vozidel*. B.m.: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. 2017
- [29] *User Manual Pathfinder* [online]. B.m.: Thunderhead Engineering. 2018. Dostupné z: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2011/07/users_guide-3.pdf
- [30] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass. : Bethesda, Md: National Fire Protection Association ; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.
- [31] REYNOLDS, Craig W. Steering behaviors for autonomous characters. In: *Game developers conference*. B.m.: Citeseer, 1999, s. 763–782.
- [32] *Technical Reference Pathfinder* [online]. B.m.: Thunderhead Engineering. 2018. Dostupné z: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2011/07/tech_ref-1.pdf
- [33] RONCHI, Enrico a Daniel NILSSON. Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings. *Building Simulation* [online]. 2014, 7(1), 73–87. ISSN 1996-8744. Dostupné z: doi:10.1007/s12273-013-0132-9
- [34] MOST, Thomas a Johannes WILL. Sensitivity analysis using the Metamodel of Optimal Prognosis. *Weimar Optimization and Stochastic Days*. 2011, 8, 24–40.
- [35] MOST, Thomas a Johannes WILL. Metamodel of Optimal Prognosis-an automatic approach for variable reduction and optimal metamodel selection. *Proc. Weimarer Optimierungs-und Stochastiktage*. 2008, 5, 20–21.
-

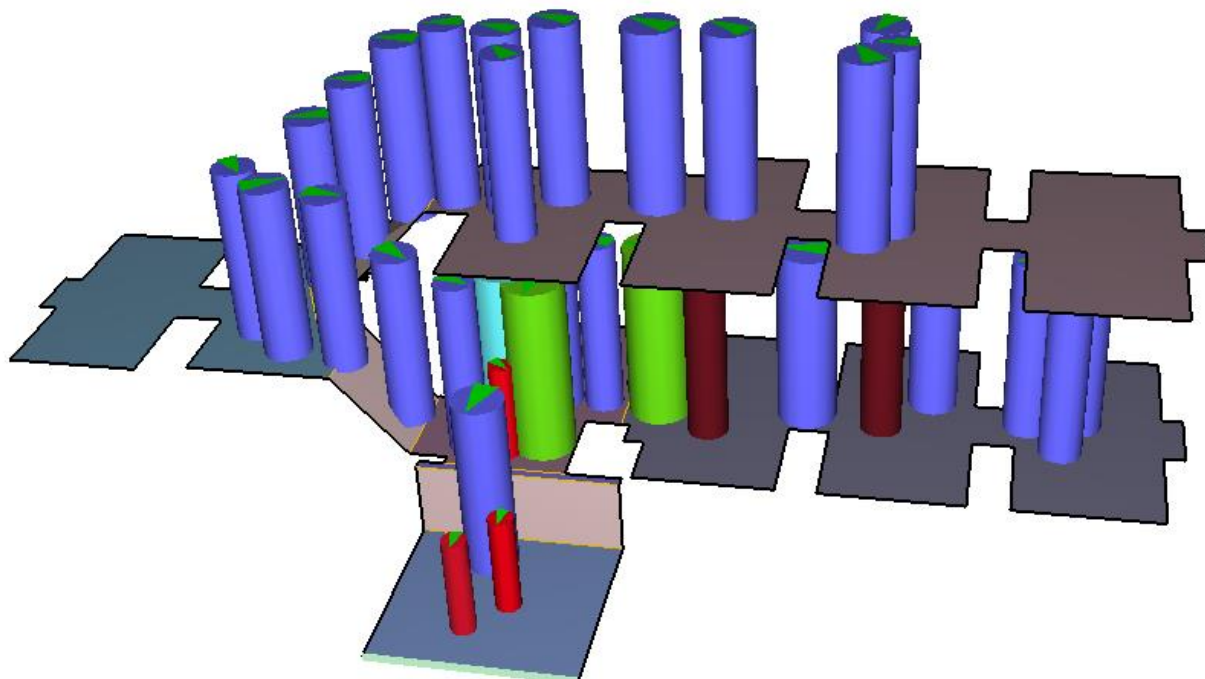
Příloha – obrázková příloha



obr. 52 Vizualizace průběhu evakuace pomocí evakuačního modelu Pathfinder – evakuace na nástupiště, šířka nástupního prostoru 650 mm, homogenní skupina osob



obr. 53 Vizualizace průběhu evakuace pomocí evakuačního modelu Pathfinder – evakuace na schodiště, šířka nástupního prostoru 1200 mm, heterogenní skupina osob



obr. 54 Vizualizace průběhu evakuace pomocí evakuačního modelu Pathfinder – evakuace na terén, šířka nástupního prostoru 1200 mm, heterogenní skupina osob