



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH A  
INFORMATIKY**

INSTITUTE OF COMPUTER AIDED ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE

**MODELOVÁNÍ POHYBU OSOB UVNITŘ  
SPORTOVNÍHO STADIONU**

PEDESTRIAN MODELLING INSIDE THE FOOTBALL STADIUM

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

David Foldyna

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Mgr. TOMÁŠ APELTAUER, Ph.D.

**BRNO 2018**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3656 Městské inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program
<b>Studijní obor</b>	3647R025 Městské inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	David Foldyna
<b>Název</b>	Modelování pohybu osob uvnitř sportovního stadionu
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

---

doc. Ing. Aleš Krejčí, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. 2009.

Fruin, J. J.: Pedestrian Planning and Design. Elevator World, Inc., 1971.

Still, G. K.: Crowd Dynamics. Dizertační práce, University of Warwick, Department of Mathematics, 2000.

Still, G. K.: Introduction to Crowd Science. CRC Press, 2014.

Tubbs, J.; Meacham, B.: Egress Design Solutions A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning. Wiley, 2007.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce je aplikovat modelování pohybu osob na interiér sportovního stadionu. Jde zejména o využití modelu pro optimalizaci jeho geometrie, konkrétních detailů návrhu a posouzení variantních řešení obsazenosti a skladby návštěvníků.

Student bude v rámci práce demonstrovat pochopení základních principů numerického modelu pohybu osob a jeho logiky včetně schopnosti verifikace modelu a jeho kalibrace. Nezbytnou součástí bude statistické vyhodnocení výsledků.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je nastínit základní principy davových mechanismů a statické a dynamické vlastnosti skupiny osob. Dále možnosti využití počítačových agentních modelů pro simulaci pohybu davu a jejich vlastní aplikaci na pohyb lidí v interiéru fotbalového stadionu, posouzení různých variant obsazenosti stadionu a statistickou analýzu zjištěných výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotbalový stadion, model pohybu osob, analýza, davové mechanismy, agentní technologie

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis is to plot basic principles of crowd mechanisms and static and dynamic attributes of pedestrians. Further analyzing the possibilities of using computer agent models for crowd simulations and its application for pedestrian movement in the interior of football stadium, assessment of different variations of population of the stadium and statistic analysis of the results.

## **KEYWORDS**

Football stadium, pedestrian model, analysis, crowd mechanisms, agent technology

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

David Foldyna *Modelování pohybu osob uvnitř sportovního stadionu*. Brno, 2018. 68 s..  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace  
inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2018

---

David Foldyna  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Mgr. Tomáši Apeltauerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Petře Okřinové za poskytnutí podkladů a odbornou pomoc a Brněnským komunikacím a.s. za poskytnutí podkladů.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEORIE POHYBU OSOB.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1</b>	<b>Historie.....</b>	<b>2</b>
2.1.1	Muslimská pouť do Mekky.....	3
2.1.2	Loveparade v Duisburgu.....	4
2.1.3	Tragédie na stadionu Hillsborough.....	5
<b>2.2</b>	<b>Davové mechanismy.....</b>	<b>6</b>
2.2.1	Postupující davový kolaps.....	6
2.2.2	Tlačení.....	6
2.2.3	Chování davu.....	6
2.2.4	Panika.....	7
<b>2.3</b>	<b>Statické a dynamické vlastnosti skupiny osob.....</b>	<b>8</b>
2.3.1	Individuální prostor.....	8
2.3.2	Statická hustota.....	9
2.3.3	Dynamická hustota.....	10
2.3.4	Rychlost, hustota, intenzita.....	10
2.3.5	Úroveň kvality pěší dopravy – Level of Service.....	11
2.3.6	Nejmenší možné úsilí.....	13
2.3.7	Síťová analýza.....	13
<b>3</b>	<b>OCHRANA MĚKKÝCH CÍLŮ.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Principy zabezpečení.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Bezpečnostní prvky.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3</b>	<b>Útok na Stade de France.....</b>	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>MODELY A SIMULACE POHYBU OSOB.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1</b>	<b>Verifikace, kalibrace a validace modelu.....</b>	<b>17</b>
4.1.1	Verifikace.....	17
4.1.2	Kalibrace.....	17
4.1.3	Validace.....	18
4.1.4	Standardizace procesu verifikace a validace modelu.....	18
<b>4.2</b>	<b>Technologie modelů.....</b>	<b>18</b>
4.2.1	Makroskopické modely.....	18
4.2.2	Celulární automaty.....	19
4.2.3	Agentní technologie.....	21
<b>4.3</b>	<b>Vstupní data.....</b>	<b>21</b>
4.3.1	Geometrie.....	21
4.3.2	Populace.....	22
4.3.3	Reakční doba.....	23
4.3.4	Rychlost pohybu.....	23
4.3.5	Volba trasy.....	25
<b>4.4</b>	<b>Analýza výsledků.....</b>	<b>25</b>

4.4.1	Obecná pravidla pro interpretaci výsledků .....	25
<b>4.5</b>	<b>Software .....</b>	<b>26</b>
4.5.1	Pathfinder.....	26
4.5.2	VISWALK.....	28
4.5.3	EXODUS .....	30
4.5.4	Další software .....	34
<b>5</b>	<b>MODEL POHYBU OSOB – FOTBALOVÝ STADION BRNO .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Popis oblasti.....</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Aplikovaný model pohybu osob.....</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Analýza dopadu různé skladby diváků .....</b>	<b>37</b>
5.3.1	Varianta 1 – ČSN.....	37
5.3.2	Varianta 2 – mladé publikum.....	39
5.3.3	Varianta 3 – staré publikum.....	41
5.3.4	Porovnání jednotlivých variant .....	43
<b>5.4</b>	<b>Analýza dopadu uzavření únikových východů .....</b>	<b>44</b>
5.4.1	Varianta 1 – východy naproti sobě .....	46
5.4.2	Varianta 2 – východy na stejné straně .....	47
5.4.3	Porovnání jednotlivých variant .....	49
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>59</b>

# 1 ÚVOD

Tématem této práce je modelování pohybu osob na fotbalovém stadionu. Tato problematika je v dnešní době poměrně aktuální – modely pohybu osob mají široké využití z důvodu nárůstu událostí s velkou návštěvností. S tím roste zároveň počet tragických událostí způsobených špatným managementem davu či pochybení v projektové dokumentaci, např. nedostatečný počet únikových východů a podobně. Modely pohybu osob mohou pomoci při zjišťování rizik a napomout jejich eliminaci. Jejich využití je jak pro události v exteriéru i interiéru, tak i pro krizové a nekrizové situace. Výhodou těchto modelů je možnost nasimulovat děje, které je náročné nebo nemožné otestovat v reálném prostředí. Nutným předpokladem pro získání použitelných závěrů je vložení správných vstupních údajů a korektní vyhodnocení zjištěných dat.

Cílem této práce je aplikovat model pohybu osob na interiér fotbalového stadionu v Brně a analyzovat dopady různé skladby návštěvníků a uzavření východů z důvodu útoku nebo požáru. Posledním krokem je statistické vyhodnocení zjištěných závěrů. Zároveň má práce nastínit teorii pohybu osob a technologie modelů a simulací.

První část práce se zabývá teorií pohybu osob. Zmiňuje se zde historie nejvýznamnějších davových tragédií a jejich příčinách, zabývá se davovými mechanismy a chováním davu a statickými a dynamickými vlastnostmi skupiny osob. Na tuto část navazuje analýza ochrany měkkých cílů, což je oblast související s problematikou pohybu osob.

Třetí část se věnuje modelům a simulacím pohybu osob. Zabývá se jednotlivými technologiemi modelů, používaným softwarem a nutnými vstupními daty pro tvorbu modelů. Také je zde vysvětlen postup analýzy výsledků.

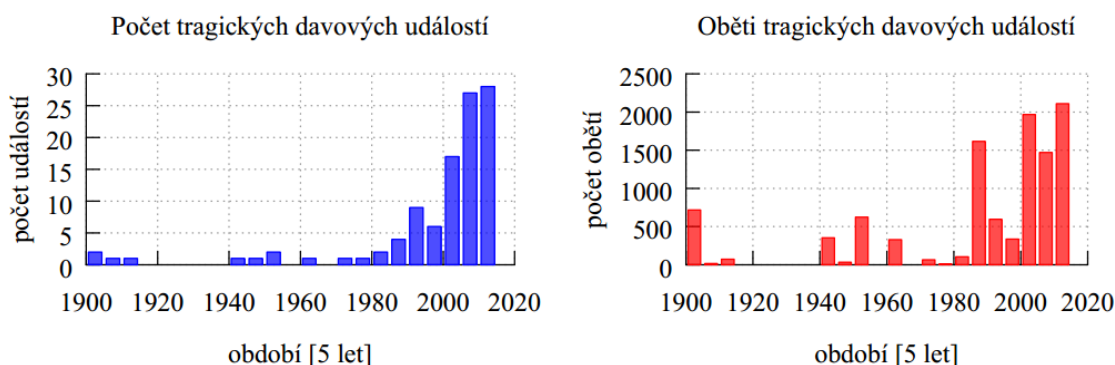
Praktická část práce se zabývá aplikací modelu pohybu osob na Zemský fotbalový stadion Brno. Tato část zkoumá různé varianty vstupních dat, jako je rychlost, reakční doba či uzavření některých východů na celkovou dobu evakuace stadionu a případný vliv v dalších oblastech. Na to navazuje analýza zjištěných výsledků. Závěr práce shrnuje zjištěné poznatky.

## 2 TEORIE POHYBU OSOB

Pod pojmem teorie pohybu osob rozumíme principy vzniku davů lidí a jejich chování a vznik nadkritických hustot a s tím souvisejících bezpečnostních rizik. Rozlišujeme pohyb osob v uzavřených a otevřených prostorech a analyzujeme vlastnosti davů v závislosti na tom, zda jsou statické či dynamické.

### 2.1 HISTORIE

Od začátku minulého století postupně roste počet velkých sportovních a kulturních akcí a počet jejich účastníků. Zároveň s tím ovšem rovněž přibývá tragických davových událostí, způsobených většinou špatnou organizací davu. Od roku 1900 bylo celosvětově zaznamenáno více než 100 fatálních incidentů spojených s koncentrací velkého počtu osob, které přinesly oběti na životech [1]. Z obrázku 2.1 je patrný nárůst počtu těchto tragédií i jejich obětí.



Obrázek 2.1 Vývoj počtu tragických davových událostí a jejich obětí [1]

Jak je patrné z následujících tabulek, nejtragičtější události se velice často odehrávají v Asii, zejména při náboženských svátcích. Nejvíce obětí na evropském kontinentu si vyžádalo selhání pořadatelů při fotbalovém utkání na stadionu Hillsborough v anglickém Sheffieldu. Další poměrně nedávnou mediálně známou událostí je tragédie na festivalu Loveparade v Duisburgu v roce 2010.

Deset nejtragičtějších událostí v historii			
Rok	Místo	Oběti	Událost
2015	Saúdská Arábie	>2000	Velká pouť do Mekky
1990	Saúdská Arábie	1426	Velká pouť do Mekky
2005	Irák	953	Pouť šíitů
1903	USA	602	Požár Iroquious Theatre v Chicagu
1954	Indie	500	Hinduistická náboženská pouť
1942	Itálie	354	Letecký útok RAF
2010	Kambodža	347	Festival na konci období dešťů
2006	Saúdská Arábie	345	Velká pouť do Mekky
1964	Peru	328	Fotbalový zápas
2005	Indie	291	Hinduistická náboženská pouť

Tabulka 2.1 Přehled nejzávažnějších událostí v historii [1]

Deset nejtragičtějších událostí v Evropě, USA a Japonsku od roku 1980			
Rok	Místo	Oběti	Událost
2003	USA	100	Požár hudebního klubu
1989	Anglie	96	Fotbalový zápas
1982	Rusko	66	Fotbalový zápas
1999	Bělorusko	53	Koncert
1982	Belgie	39	Fotbalový zápas
2003	USA	21	Hudební klub
2010	Německo	21	Love Parade
2001	Japonsko	11	Ohňostroj
1991	USA	9	Basketbalový zápas
2000	Dánsko	9	Koncert

Tabulka 2.2 Přehled nejzávažnějších incidentů v Evropě, USA a Japonsku od roku 1980 [1]

### 2.1.1 Muslimská pouť do Mekky

Hadždž je pouť do muslimského posvátného města Mekka, kterou by měl každý věřící vykonat alespoň jednou za život, pokud je toho schopen. Jedním z důležitých rituálních míst je most Jamaraat, který musí přejít každý poutník. V minulosti se v souvislosti s touto poutí událo nespočet tragédií, z nichž nejhorší byla roku 1990 smrt 1426 poutníků v důsledku přeplnění tunelu a jejich následného ušlapání a udušení. Mezi lety 1991 a 2005 zemřelo při podobných incidentech dalších 701 osob, roku 2006 zemřelo na mostě Jamaraat 345 lidí [2]. Na to saúdská vláda zareagovala vylepšením infrastruktury a postavením nového mostu se zvýšenou kapacitou z 200 000 na 600 000 osob. Nicméně některé okolní lokality rekonstrukcí neprošly, což způsobilo zvýšenou koncentraci osob na těchto místech [1].

V roce 2015 při této pouti došlo ke katastrofě, která byla způsobena setkáním dvou proudů poutníků na křižovatce ulic č. 204 a 223 při pochodu směrem k mostu Jamaraat. Toto místo původně nebylo označeno jako kritický bod. V důsledku selhání pořadatelů bylo jedné skupině poutníků povoleno vyrazit na cestu v čase, který jí nebyl určen, což v kombinaci s nedostatečnou kapacitou způsobilo zvýšenou hustotu osob na křižovatce [3].



Obrázek 2.2 Schéma pohybu proudů poutníků a místo tragédie [1]



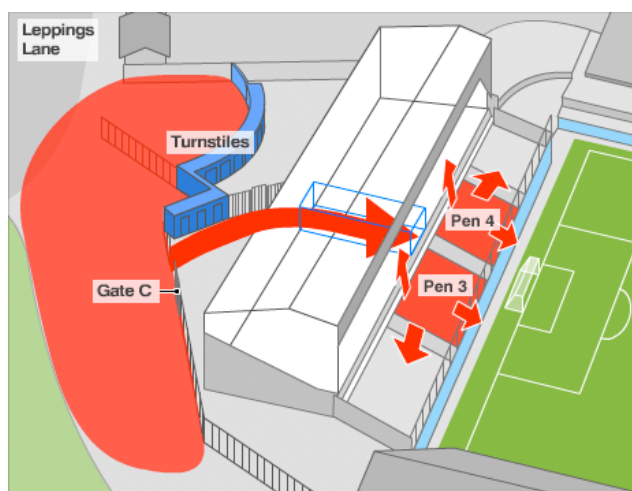
## 2.1.3 Tragédie na stadionu Hillsborough

Jedna z nejhorších tragédií v britské fotbalové historii se odehrála 15. dubna 1989 na stadionu Hillsborough v Sheffieldu, kde se utkaly týmy Nottinghamu a Liverpoolu v rámci semifinále anglického poháru. Pro fanoušky Liverpoolu byla vyhrazena tribuna Leppings Lane o kapacitě 14 600 diváků. Stadion v minulosti hostil několik podobných utkání. Například v roce 1981 zde došlo k tlačenci, při níž bylo zraněno 38 lidí, a z toho důvodu byla postupně tribuna Leppings Lane rozdělena na 5 sektorů. V 80. letech také byly na většině britských stadionů tribuny od hrací plochy odděleny ocelovým plotem v reakci na výtržnosti fanoušků [6] [7].

24 000 fanoušků Liverpoolu, z nichž někteří neměli na zápas vstupenku, přicházelo ke stadionu z ulice Leppings Lane ke vstupům na pro ně vyhrazenou tribunu o kapacitě 14 600 diváků. 20 minut před začátkem utkání se před vstupem na tribunu shromáždilo velké množství fanoušků, kteří se chtěli dostat dovnitř. Vzniklo tak úzké hrdlo, v němž se nahromadilo více lidí, než kolik se jich mohlo vejít do sektorů 3 a 4 uprostřed tribuny Leppings Lane. Z toho důvodu se lidé, kterým nebyl umožněn vstup, nebyli schopni dostat ven. U turniketů bylo nahromaděno 5000 lidí, jejichž bezpečnost začínala být nevladatelná, a proto byla otevřena brána C určená pro východ ze stadionu, aby se ulevilo tlaku lidí na turniketech. Tím pádem se dalších 2000 fanoušků dostalo do již zaplněných sektorů 3 a 4, jelikož u vchodu do tunelu nebyli stevardi, kteří obvykle v podobných případech instruovali příchozí, aby směřovali do ještě nezaplňených sektorů. Lidé v předních řadách byli natlačeni na ocelový plot oddělující tribunu od hřiště. Někteří fanoušci plot přelezli, ale nakonec se plot pod tíhou lidí zhroutil. Výsledkem bylo 96 mrtvých v důsledku udušení nebo ušlapání a 766 zraněných [6] [7].

Hlavní příčinou tragédie bylo otevření brány C, kterou se fanoušci dostali do již obsazených sektorů a neuzavření tunelu. S tím souvisí také to, že na místě nebyl personál, který by nově příchozí nasměroval do vedlejších sektorů, ve kterých stále bylo volné místo. Tragédii také mohlo být zabráněno, kdyby stejně jako v dřívějších letech byl ještě před turniketech kordon policistů na koních, kteří nepouštěli dále diváky bez vstupenek. Pokud by tomu tak bylo i v tomto případě, je pravděpodobné, že by dav lidí byl mnohem menší [6] [7].

V důsledku tragédie se ve Velké Británii přešlo k novým bezpečnostním opatřením na fotbalových stadionech, zejména zavedení pouze míst na sezení, nová pravidla ohledně prodeje alkoholu, turniketů, plotů, cen vstupenek a podobně [6].



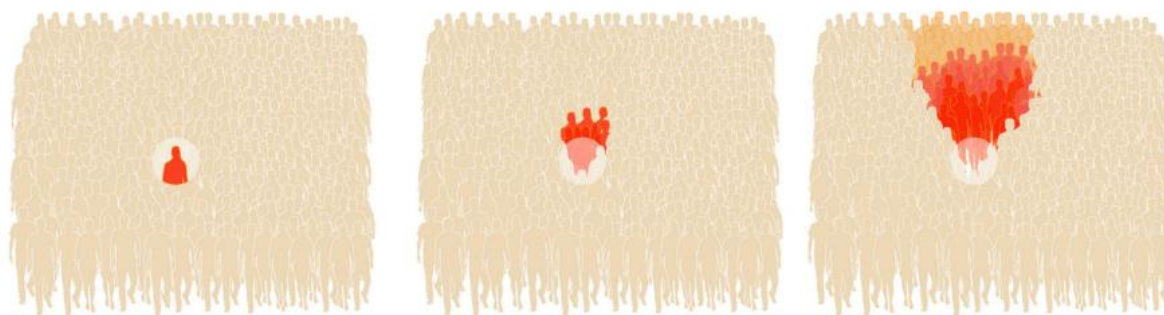
Obrázek 2.4 Schéma pohybu lidí při tragédii v Hillsborough [6]

## 2.2 DAVOVÉ MECHANISMY

K událostem, kdy hustota osob přesáhne kritickou hodnotu, dochází ve světě pravidelně, a v průměru každé 4 měsíce tato událost skončí tragicky [1]. Společným činitelem všech těchto incidentů je zvýšení hustoty osob nad kritickou hodnotu, způsobené buď nedostatečnou organizací davu, nebo pochybením již při návrhu, kdy prostor nesplňuje potřebná bezpečnostní a prostorová kritéria, či je špatně vyhodnoceno předpokládané chování davu.

### 2.2.1 Postupující davový kolaps

K postupujícímu davovému kolapsu dochází v momentu, kdy hustota osob v davu přesáhne kritickou hodnotu. Nejčastějším spouštěčem je pád jednotlivce, například kvůli uklouznutí nebo šokové vlně šířící se davem. To způsobí, že se v davu utvoří mezera a působící síly náhle nejsou v rovnováze. Osoby jsou tlačeny do tohoto místa a namačkány na sebe, dokud nedojde k poklesu tlaku pod kritickou hodnotu. Tento proces často způsobuje podobné jevy na jiných místech davu [1].



Obrázek 2.5 Postupující davový kolaps [1]

Postupující davový kolaps je dominantním faktorem tragédií, byl příčinou tragédie v Mekce i na Loveparade v Duisburgu a mnohých dalších událostech v historii. Obranou proti jeho vzniku je zamezení vzniku nadkritické hustoty, která odebere jednotlivcům schopnost individuálního jednání [1].

### 2.2.2 Tlačení

Dalším, méně častým jevem je tlačení. V jeho důsledku jsou účastníci rozdrceni okolním davem. Tato situace je způsobena vysokou hustotou návštěvníků v kombinaci s pohybem davu proti pevné překážce. Zvyšuje se tlak na osoby v blízkosti překážky a dochází k jejich udušení nebo rozdrcení. Tlačení byla příčinou tragédie na Hillsborough. Základním předpokladem pro zabránění tlačení je zabránit zvýšení hustoty osob (nepouštět další osoby při dosažení maximální kapacity areálu) nad kritickou hodnotu a informovat návštěvníky o aktuální situaci [1]. Obě podmínky nebyly v případě Hillsborough splněny.

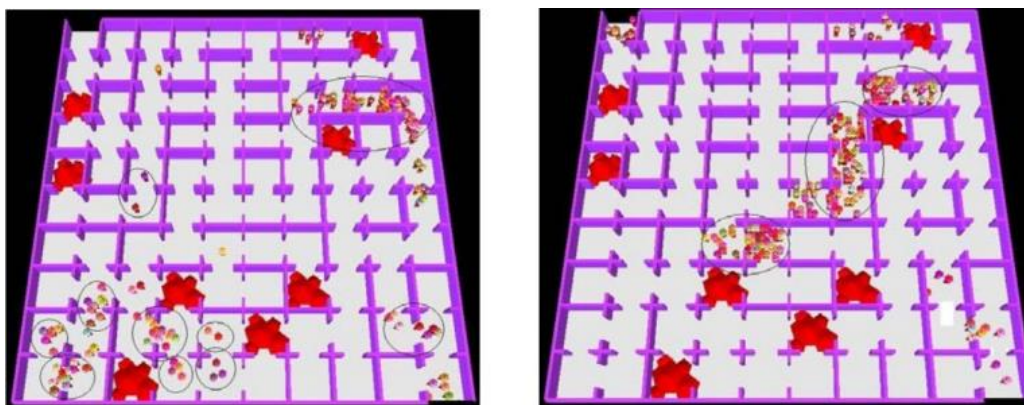
### 2.2.3 Chování davu

Při řešení pohybu osob na veřejných místech uvažujeme také s několika parametry týkajícími se psychologie davu. Jedním z nich je komunikace. Do této kategorie patří metody pro upozornění davu na hrozící nebezpečí – alarmany, sirény, varovná hlášení apod. Také vjemy

jednotlivce jako je změna teploty, pohyb ostatních osob, zvuky, zápachy, a vizuální vjemy spustí jeho reakci na danou situaci.

Každá osoba je také schopna vyvinout jinou rychlost. Jinak se pohybují malé děti, starší osoby nebo osoby se zdravotním postižením. Důležitým faktorem je také sociální skupina osob - typickým příkladem je chování otce s rodinou nebo matky s dítětem. Na chování v krizové situaci má také vliv ostražitost – každý jednotlivec zareaguje jinou rychlostí. Vliv má také pozice jednotlivce – sedící osoba se bude chovat jinak než stojící. Osoby, které dané místo dobře znají, také budou reagovat rychleji. Vliv na chování davu má rovněž komplexnost daného místa – čím více únikových východů, tím více bude jednotlivec nerozhodný. Důležité je také správné a přehledné značení – to také ovlivňuje chování a rychlost reakce osob [8]. Jestliže osoby nejsou obeznámeny s vnitřní organizací budovy, mohou zvolit delší a nevhodnou únikovou trasu.

Při evakuaci během krizové situace lidé přirozeně hledají vůdce. Jestliže v davu není přítomen školený vůdce např. z řad hasičů, dav si obvykle vůdce zvolí. Poté mohou nastat dva scénáře zobrazené na následujícím obrázku – v prvním případě vzniká mnoho menších skupin s vlastním vůdcem, ve druhém případě malé množství velkých skupin. V prvním případě evakuace probíhá rychleji, protože jednotlivé skupiny prozkoumávají prostředí a vzájemně si vyměňují informace [9].



Obrázek 2.6 Vliv počtu vůdců na evakuaci [9]

## 2.2.4 Panika

Média a veřejní činitelé často označují paniku jako příčinu úmrtí při davových tragédiích. Panika je charakterizována jako davové sobecké chování nekontrolované sociálními nebo kulturními omezeními, s cílem utéct před bezprostředním ohrožením, což zvyšuje riziko pro sebe i okolní osoby. Nicméně ve skutečnosti v drtivé většině případů nedochází k panice, ale jen k úzkosti či strachu. Naopak může dojít k altruistickému chování, což znamená, že namísto soupeření se účastníci snaží pomáhat ostatním. Často také dochází k tomu, že si lidé ani neuvědomují, že se nacházejí v ohrožení. Důležitým úkolem je tedy účastníky davového jevu přesvědčit, že jim hrozí nebezpečí, pokud si toho nejsou vědomi [10].

Dalším častým mýtem je přesvědčení, že dav lidí je něco jiného než skupina jednotlivců; že když dojde k tragédii, jednotlivci se stanou součástí davu, který reaguje jako celek. Tomuto chování se říká také chování stáda. Ve skutečnosti je dav spíše skupina jednotlivců, kteří si v krizové situaci rozdělí role podle svých zkušeností a vzájemných vztahů [10].

Důsledkem špatného pochopení těchto fenoménů dochází k negativním vlivům na bezpečnost při davových tragédiích. Příkladem může být panika. Zažitý mýtus, že lidé při

takových událostech panikaří, způsobí to, že přeživší informují o tom, jak dav zasáhla panika. V důsledku toho veřejní činitelé namísto toho, aby podali informace potřebné ke správnému řešení situace, tyto informace zamlčují, jelikož se mylně obávají, že by způsobily v davu paniku [10].

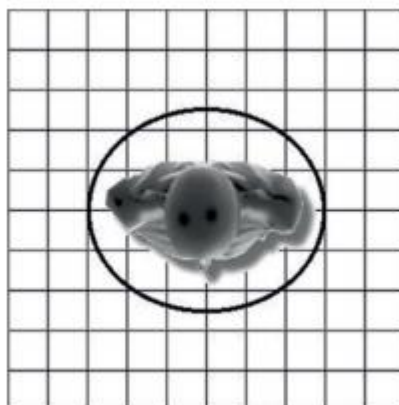
## 2.3 STATICKÉ A DYNAMICKÉ VLASTNOSTI SKUPINY OSOB

Při navrhování prostor pro pohyb velkého množství osob je potřeba brát v úvahu jejich statické a dynamické vlastnosti. Tyto vlastnosti se odlišují podle toho, jestli jsou osoby v pohybu nebo stojí a je potřeba je posuzovat odděleně. V závislosti na těchto vlastnostech jsou prostory navrhovány tak, aby vyhovovaly požadovaným bezpečnostním standardům a poskytovaly dostatečný komfort. Je potřeba podotknout, že tyto standardy se liší v závislosti na tom, zda se jedná o chování chodců na městské ulici, sportovním stadionu, či při evakuaci v krizových situacích.

### 2.3.1 Individuální prostor

Hloubka těla a šířka ramen jsou základními rozměry používanými při posuzování prostorů pro chodce. Šířka ramen je hlavní faktor při navrhování průchodů schodišť apod [8].

Jednotlivec je s ohledem na prostor, který zaujímá, popisován tzv. elipsou těla. Tato elipsa je definována jako půdorysný rozměr člověka s určitým přidaným osobním prostorem, který odráží jeho snahu vyhýbat se kontaktu s okolními osobami. Tato elipsa má délku os 61 cm a 46 cm a plochu 0,22 m<sup>2</sup>. Z toho vyplývá, že maximální komfortní hustota dosahuje 4 až 5 osob na m<sup>2</sup> [1].



Obrázek 2.7 Schematické zobrazení elipsy těla ve čtverci 1x1 m [1]

Také je potřeba brát v úvahu to, že průměrné rozměry lidského těla se liší v závislosti na pohlaví a místu původu.

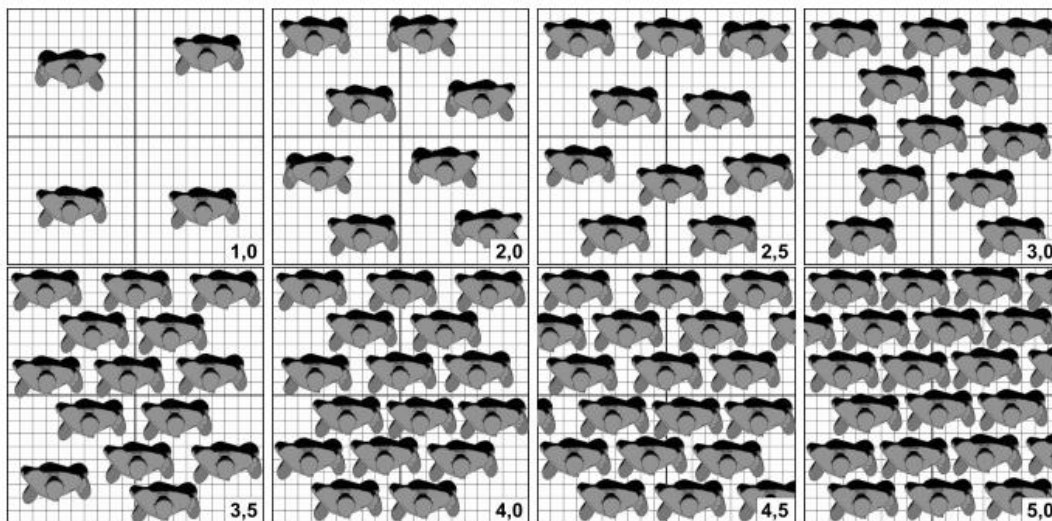
Rozměry lidského těla			
Země původu	Šířka (cm)	Hloubka (cm)	Plocha (m <sup>2</sup> )
Velká Británie – muž	51,0	32,5	0,26
Velká Británie – žena	51,0	32,5	0,26
Polsko – muž	47,5	27,5	0,21
Polsko – žena	41,0	28,5	0,18

Francie – muž	51,5	28,0	0,23
Francie – žena	47,0	29,5	0,22
Švédsko – muž	51,0	25,5	0,20
Švédsko – žena	42,5	30,0	0,20
Švýcarsko – muž	51,5	28,0	0,22
Švýcarsko – žena	47,0	29,5	0,23
Průměr	45,6	28,2	0,20
Maximum	51,5	32,5	0,26

Tabulka 2.3 Rozměry lidského těla v evropských zemích [1]

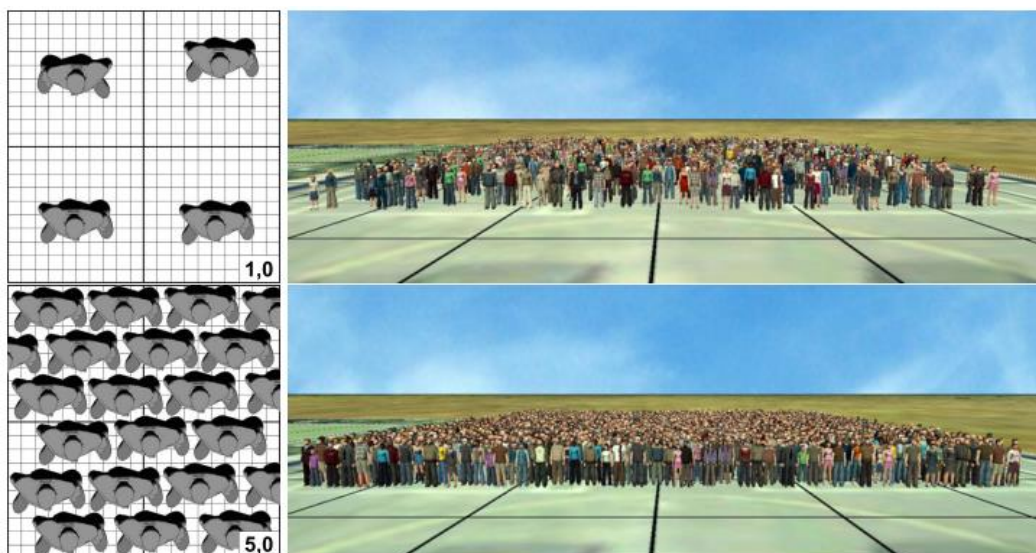
### 2.3.2 Statická hustota

Z obrázku je patrné, že hraniční statickou hustotou je z bezpečnostních hledisek 5 osob na metr čtvereční. Podstatné je, že tato hodnota platí za předpokladu, že všechny osoby se dívají stejným směrem (např. koncert, sportovní utkání). V opačném případě je maximální statická hustota nižší, a to v přímé úměře s nahodilostí preferovaných směrů [1].



Obrázek 2.8 Statická hustota osob od 1 do 5 osob/m<sup>2</sup> v půdorysném pohledu [1]

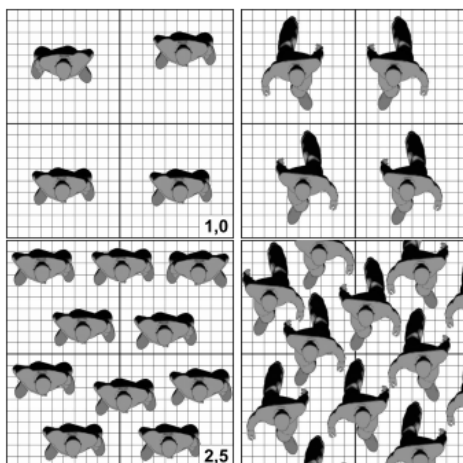
Také platí, že při šikmém pohledu operátora na dav, např. průmyslovou kamerou, je vizuální dojem odlišný než při půdorysném pohledu (věž, helikoptéra). Šikmý pohled tuto hustotu subjektivně zkresluje směrem k vyšším hodnotám [1].



Obrázek 2.9 Srovnání půdorysného a šikmého pohledu na dav lidí o různých hustotách [1]

### 2.3.3 Dynamická hustota

Prostorové nároky pro pohybující se osoby jsou větší než pro osoby stojící, a proto je bezpečná hustota pohybující se skupiny osob nižší, než v případě stojící skupiny. Bezpečný limit hodnoty dynamické hustoty dosahuje zhruba 4 osob na metr čtvereční. Tuto skutečnost je nutné vzít do úvahy také při bezpečnostním posouzení různých prvků jedné události (např. vstupní koridor na stadion vs. hlediště) [1]. Kapacita prostoru pro pohyb osob je limitována jeho nejužším místem [8].

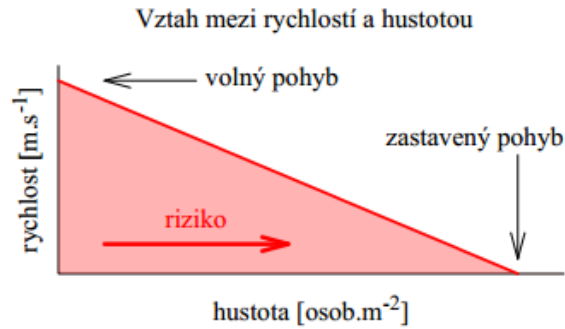


Obrázek 2.10 Srovnání statické a dynamické hustoty v půdorysném pohledu [1]

### 2.3.4 Rychlost, hustota, intenzita

Pohyb osob funguje na principech analogických se silniční dopravou. Jedná se o vzájemné vztahy mezi rychlostí, hustotou a intenzitou proudu osob. Měření těchto veličin probíhá stejným způsobem jako v silniční dopravě.

Rychlost pohybu osob v davu závisí na hustotě. Ve vztahu mezi rychlostí a hustotou zjednodušeně platí, že čím větší je hustota osob, tím pomaleji se pohybují [1].

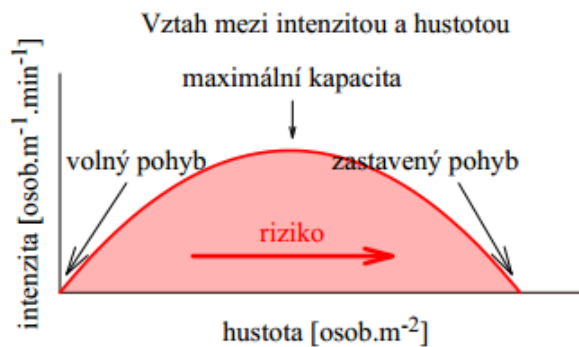


Obrázek 2.11 Vzájemný vztah mezi rychlostí a hustotou osob [1]

V davu lidí platí, že každý člověk se pohybuje jinou rychlostí. V závislosti na hustotě davu se také jednotlivci rozhodují jiným způsobem. Tyto skutečnosti z tohoto vztahu dělají komplexní problém. Dalším faktorem jsou také geometrické parametry prostředí. Hustoty až 5 osob na metr čtvereční jsou poměrně běžné na sportovních stadionech. Přesto je pohyb osob možný, a to proto, že funguje fenomén sebeorganizace davu. To lze popsat jako situaci, kdy se 2 proudy lidí směřující proti sobě změňjí na 2 řetězy osob procházejících vedle sebe opačným směrem [8].

Rozdíl je rovněž mezi sportovním stadionem a otevřeným prostorem, například městskou ulicí. V otevřeném prostoru platí, že dochází k značnému snížení rychlosti pohybu v případě, že kolem člověka je menší prostor než 1 metr čtvereční. To je ovšem způsobeno tím, že lidé chodí všemi směry. V případě vstupu na sportovní stadion, kde je možný pohyb pouze 2 směry, nemá zvýšená hustota tak markantní vliv na rychlost pohybu [8].

Ve vztahu mezi intenzitou a hustotou platí, že k maximální kapacitě dochází v okamžiku, kdy hustota narůstá, ale ne natolik, aby omezovala rychlost pohybu. Jestliže hustota dál roste, zpomaluje se rychlost proudění, až dojde k úplnému zastavení [1]. Hodnota maximální bezpečné intenzity je 109 osob.m<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> [8].



Obrázek 2.12 Vzájemný vztah mezi intenzitou a hustotou osob [1]

Základním cílem je zajistit rozumnou míru bezpečí pro návštěvníky na sportovním stadionu. Nicméně, teoretické absolutní bezpečí je v praxi nedosažitelné [8].

### 2.3.5 Úroveň kvality pěší dopravy – Level of Service

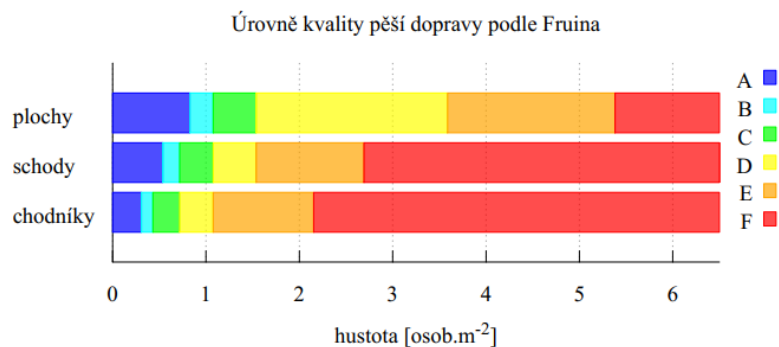
John Fruin v 70. letech minulého století ve svých výzkumech definoval tzv. „Level of service“. Podle tohoto konceptu jsou rychlost a hustota davu základními kritérii pro návrh

veřejných ploch z bezpečnostního hlediska a z hlediska komfortu. Je potřeba podotknout, že tento princip je navržen zejména pro použití v uličním prostředí. [8]

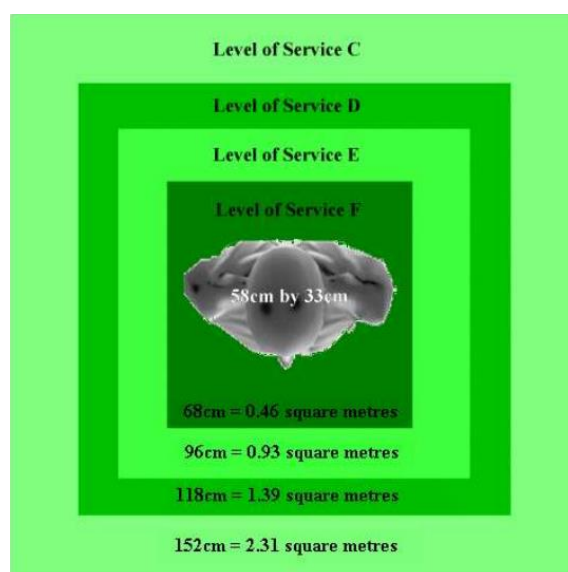
Pro data v tabulce 2.4 bylo použito oblečeného člověka o rozměrech 58x33 cm. Level of Service se udává v metrech čtverečních a je rozdělen do kategorií A až F podle komfortu. Hodnoty se liší v závislosti na tom, zda se jedná o průchody, schodiště nebo místa, na kterých se tvoří fronty.

Level of Service	A	B	C	D	E	F
Chodníky	>3,25	3,25 – 2,32	2,32 – 1,39	1,39 – 0,93	0,93 – 0,46	< 0,46
Schodiště	>1,85	1,85 – 1,39	1,39 – 0,93	0,93 – 0,65	0,65 – 0,37	< 0,37
Plochy	>1,21	1,21 – 0,93	0,93 – 0,65	0,65 – 0,28	0,28 – 0,19	< 0,19
A = volné plynutí davu			D = omezený pohyb pro většinu lidí			
B = nevýznamné konflikty			E = omezený pohyb pro všechny			
C = mírné omezení rychlosti			F = nesouvislý pohyb			

Tabulka 2.4 Level of Service



Obrázek 2.13 Srovnání úrovně kvality pěší dopravy pro různé plochy [1]



Obrázek 2.14 Level of Service [8]

Tato data vypadají velmi optimisticky, což je dáno tím, že jsou určena primárně pro pohyb na ulicích. Pokud je dostupný dostatečný prostor, pak tyto směrnice představují ideální podmínky. Nicméně, na sportovních stadionech tolik prostoru nenajdeme a hustoty davu mohou překračovat hodnoty dané Fruinem. Platí tedy, že tato data jsou užitečným vodítkem, ovšem musí být brány v potaz místní podmínky, jako je velikost lidí v dané oblasti nebo množství lidí v určitých časových úsecích, jako je příchod nebo odchod ze stadionu [8]. V českých normách tato metoda zatím není aplikována.

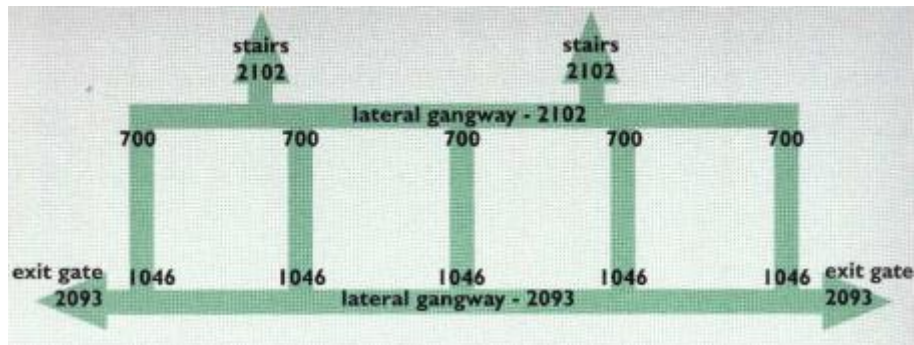
### 2.3.6 Nejmenší možné úsilí

Vstupní kapacita stadionu je definována jako počet diváků, kteří mohou vstoupit dovnitř v průběhu 1 hodiny. V praxi ale je na mnoha stadionech vstup otevřen již více než hodinu před začátkem utkání. Navíc na mnoha akcích zase diváci přicházejí ve velkém počtu těsně před začátkem. Tyto faktory by měly být zváženy při návrhu počtu vstupů nebo turniketů. Vstupní brány na stadion by měly být navrženy tak, aby mezi ně byli diváci rovnoměrně rozmístěni a nedocházelo ke vzniku hromadění návštěvníků před vchodem [8].

Přirozeným chováním člověka je, že se snaží dostat z bodu A do bodu B co nejkratší a nejjednodušší trasou. Tento princip je nazýván „nejmenší možné úsilí“ [8]. Lidé si např. vybírají nejkratší cestu s co nejmenším počtem ostrých zatáček, proto s ohledem na geometrii stadionu jsou některé vstupy používány více než ostatní. V praxi to tedy znamená, že je potřeba brát v úvahu rozdělení osob mezi jednotlivé vstupy. Z toho důvodu nemusí být kapacita vstupu rovna součinu kapacity jednoho turniketu a jejich celkového počtu. S faktorem „nejmenšího možného úsilí“ je nutno počítat při analýze rizik souvisejících s hromaděním davu [8].

### 2.3.7 Síťová analýza

Sportovní stadion je komplexní systém sestávající z mnoha cest a průchodů v jeho interiéru a množství přístupových bodů a východů. Když návštěvníci vstoupí do prostoru určeného pro odchod, měli by být schopni pokračovat v celé jeho délce a v případě jakéhokoliv incidentu by měli mít možnost použít alternativní cestu ven. Pokud je z tribuny směrem k odchodové bráně přímá cesta, tato cesta by měla být schopna pojmout proud návštěvníků pohybujících se z interiéru směrem ven. V případě, že se jedná o komplexnější systém – kombinace více odchodových cest nebo možnost výběru z více cest, měl by systém být analyzován jako síť. To zajistí, aby kapacita odchodové cesty byla dostatečná pro proudy návštěvníků směřujících k jednotlivým východům. Pokud mají návštěvníci možnost výběru z více cest, je nutné zvážit, kterou z nich zvolí větší množství osob. Například východ nejbližší k zastávce hromadné dopravy pravděpodobně přiláká větší množství osob. Stadiony, které mají takovéto komplexní odchodové systémy, by měly mít vypracovány plány této sítě a identifikovat kapacitu jejich jednotlivých úseků [8].



Obrázek 2.15 Plán sítě chodeb u odchodu ze stadionu s kapacitami jednotlivých úseků

Účelem tohoto plánu je analyzovat každý úsek systému a zajistit jeho dostatečnou kapacitu na to, aby jím všichni návštěvníci plynule prošli během doby 8 minut. [8] Například, šířka brány je 2,4 m x 109 osob za minutu x 8 minut = kapacita 2093 osob. Nicméně, při této analýze se neuvažuje s geometrií stadionu, vztahem mezi rychlostí a hustotou a interakcí jednotlivých osob. Z toho důvodu není možné brát tyto hodnoty jako stoprocentně závazné.

Davy se nepohybují a nezaplňují prostor rovnoměrně. Příkladem může být fakt, že hustota davu na rohu je větší než v okolí. [8] Tento efekt je ve vztahu s rychlostí a hustotou a má vliv na plynutí davu. Dynamické vlastnosti davu se tedy odvíjejí také od místní geometrie. Pomocí vhodné simulace můžeme studovat různé scénáře, problémy, jejich důsledky a navrhnout změny geometrie stadionu.

### 3 OCHRANA MĚKKÝCH CÍLŮ

Termínem měkké cíle rozumíme místa s vysokou koncentrací osob a nízkou úrovní zabezpečení, což z nich dělá vhodný cíl pro teroristické útoky [11]. Tím se liší od tzv. tvrdých cílů, kterými jsou dobře chráněné objekty. Mezi měkké cíle můžeme zařadit školská zařízení, obchodní centra, náboženské objekty, dopravní prostředky a kulturní a sportovní akce.

Měkké cíle posuzujeme podle atraktivity pro případný útok a podle reálné možnosti zabezpečení. Čím je prostor otevřenější pro veřejnost, tím se jeho atraktivita zvyšuje, protože u otevřených cílů je menší možnost kontroly u vstupů. Pokud má cíl vlastní bezpečnostní personál, zvyšuje se možnost bezpečnostních opatření a cíl má menší atraktivitu. Také větší množství osob zvyšuje šanci na útok a ovlivňuje bezpečnostní systém. Přítomnost policie je velkým odstrašujícím prvkem. Naopak přítomnost médií je pro útočníky velmi přitažlivá z důvodu vysoké publicity. Posledním kritériem je symboličnost cíle – pokud je subjekt pro teroristy symbolickým cílem, zvyšuje se šance na útok [11].

Příkladem měkkých cílů v Brně je například Náměstí Svobody nebo Zelný trh zejména v případě konání velkých akcí, jako jsou například trhy nebo jiné události s velkou koncentrací návštěvníků. Mezi měkké cíle bude patřit také navrhovaný nový Zemský fotbalový stadion za Lužánkami.

#### 3.1 PRINCIPY ZABEZPEČENÍ

Nejčastějším způsobem provedení teroristického útoku je útok výbušninou nebo sebevražedný útok [11]. Při zabezpečení měkkých cílů musíme brát v úvahu několik důležitých poznatků. Útoky bývají koordinované nebo simultánní, často dochází k útoku na několik cílů najednou, jako se stalo například v Paříži v listopadu 2015. Proto pokud dojde k útoku na jiný cíl ve stejném městě, je nutné podniknout bezpečnostní opatření i na ostatních potenciálních cílech. Také je potřeba na nastalou situaci okamžitě zareagovat bez ohledu na to, kolik máme dostupných informací. Časová prodleva mívá fatální důsledky [11]. Útočníci jdou cestou nejmenšího odporu a mívají změněné vnímání reality.

Při tvorbě bezpečnostních opatření si musíme nejprve ujasnit, co chráníme. V případě sportovních akcí je prioritou ochrana života a zdraví návštěvníků. Poté identifikujeme možné zdroje nebezpečí a hrozící způsoby útoku. Následuje analýza hrozeb a rizika s cílem určit prioritní hrozby, kterým se dále věnujeme, a nakonec jsou aplikována příslušná bezpečnostní opatření [11].

Bezpečnostní opatření dělíme do 3 fází – před incidentem (preventivní opatření, odstrašení útočníků), během incidentu (co nejrychlejší detekce a okamžitá reakce), a po incidentu (minimalizace dopadů). V případě teroristických útoků se zaměřujeme zejména na fázi před a po, jelikož okamžitá reakce na situaci je v silách pouze speciálně vycvičených profesionálních jednotek, které u měkkých cílů obvykle nebývají k dispozici [11].

#### 3.2 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY

Bezpečnostní prvky dělíme na fyzickou bezpečnost, mechanické prvky a elektronické prvky. Ideální je tyto způsoby navzájem vhodně kombinovat, abychom eliminovali jejich nevýhody a zvýšili účinnost bezpečnostních opatření.

Mezi fyzickou bezpečnost řadíme bezpečnostní pracovníky, kteří provádí například kontrolu u vstupu nebo pochůzkovou činnost a ostatní personál, například pořadatelé apod. Elektronickými prvky jsou kamerové systémy, poplachové zabezpečovací a tísňové systémy (PZTS), Dohledové a poplachové přijímací centrum (DPPC), vnitřní rozhlas, rentgen,

detektory kovů a výbušnin, čtečky dokladů, přístupové a docházkové systémy nebo osvětlení. Mezi mechanické prvky počítáme bezpečnostní okna a dveře, ploty, turnikety, sloupky nebo betonové bloky [11].

### 3.3 ÚTOK NA STADE DE FRANCE

Poměrně nedávným příkladem útoku na sportovní událost je útok na francouzský národní fotbalový stadion Stade de France. Tento incident byl součástí série teroristických útoků v Paříži 14. listopadu 2015.

Při fotbalovém utkání mezi Francií a Německem, které navštívilo 80 000 diváků včetně francouzského prezidenta Hollanda, se těsně po začátku utkání pokusili 3 sebevražední atentátníci vstoupit na stadion a odpálit se uvnitř. Byli vybaveni lehkými opasky, jimiž by každý z nich zabil 5 nebo 6 lidí, ale hlavní škodu by nadělala následná panika [12]. Každý z nich se pokusil vstoupit jiným vchodem, ale ani jeden z nich nebyl vpuštěn dovnitř, protože neměli vstupenky. Jeden z nich se pár vteřin poté, co ho ochranka nepustila, odpálil a zabil sebe a jednu další osobu s cílem způsobit panický útěk diváků do ulic, kde by se odpálili další 2 atentátníci. Nicméně tento plán nevyšel, jelikož fanoušci nebyli informováni o situaci, mysleli si, že jde o zábavnou pyrotechniku a zůstali uvnitř stadionu, a další dva atentátníci se odpálili o pár minut později v místech, kde nezpůsobili žádné oběti.

Francouzský prezident byl pár minut po explozích informován o situaci a svolal v kanceláři na stadionu krizový štáb. Konečné rozhodnutí bylo, že nikdo nesmí ven ze stadionu ani dovnitř, jelikož v daný moment se jednalo o nejbezpečnější místo. Informováni byli pouze trenéři jednotlivých týmů, hráči a diváci se o celé situaci dozvěděli až po ukončení utkání. Pořadatelé poté otevřeli vstupy na hrací plochu, kde se část fanoušků shromáždila a následně byli všichni evakuováni východy na opačné straně stadionu, než došlo k explozím. Pouze hráči obou týmů zůstali na stadionu přes noc.

Tato situace byla z hlediska pořadatelů dobře zvládnutá, jednak nevpuštění atentátníků dovnitř a také ponechání návštěvníků uvnitř, které zabránilo vzniku paniky a nevystavilo diváky případnému dalšímu útoku. Štěstí bylo také, že atentátníci nebyli dobře vycvičení a vzájemně synchronizovaní, a jejich plán nevyšel a došlo pouze k jedné oběti na životech civilistů, což je z velké části také zásluha pořadatelské služby.



Obrázek 3.1 Pohled na hrací plochu, kam byla evakuována část fanoušků [12]

## 4 MODELÝ A SIMULACE POHYBU OSOB

Pro simulaci pohybu osob využíváme jejich numerické modely. Pod pojmem model rozumíme zjednodušenou reprezentaci reálného děje nebo jeho části. Jde tedy o přiblížení realitě, které se ovšem s realitou nikdy úplně neshoduje. Při tvorbě modelu pohybu osob je nejdůležitější správně vymodelovat vlastnosti davu spíše než jeho vizuální vlastnosti. I ty ovšem musíme brát v úvahu – aby byl model pochopen, musí vypadat přesvědčivě. Cílem je tedy vytvořit co nejrealističtější obraz s co nejrealističtější fyzikou [8].

Modely pohybu osob využíváme a vytváříme pro lepší pochopení vlastností a chování davů, vysvětlení pozorovaných jevů a předvídání jejich vývoje zejména v situacích, které je náročné nebo nemožné ověřit reálným experimentem. [1] Takové situace mohou nastat např. v případě složitosti systému, velké časové náročnosti nebo v případě, kdy by provedení reálného experimentu bylo příliš riskantní z důvodu bezpečnostních rizik. Výsledky zjištěné těmito modely nám mohou typicky pomoci například se stavební úpravou řešeného objektu pro vyšší bezpečnost a pohodlí návštěvníků.

Podle účelu modelu je potřeba zvolit způsob zobrazení systému. Do systému zahrnujeme pouze takové vlastnosti, které jsou relevantní pro řešení daného problému a ostatní jsou vypuštěny. V praxi používané modely se skládají z určitého počtu různých submodelů, z nichž každý řeší jiné procesy a interakce. V případě modelu pohybu osob jde o modely pro vzájemnou interakci osob, interakci osob s okolím a pro modely evakuací například interakci s toxickými látkami [1].

Po výběru požadovaných vlastností přistoupíme k samotné simulaci – procesu napodobování reálného děje pomocí jeho modelu [1].

### 4.1 VERIFIKACE, KALIBRACE A VALIDACE MODELU

Při tvorbě modelů je potřeba splnit 3 základní kroky: verifikaci, kalibraci a validaci modelu.

#### 4.1.1 Verifikace

Verifikace je nezbytná část výběru vhodného nástroje před započítím tvorby samotného modelu. Verifikací modelu rozumíme ověření, zda model vyhovuje požadavkům a specifikacím pro daný účel. Zjednodušeně se tento proces dá popsat jako výběr vhodného nástroje pro tvorbu simulace. Jako příklad lze uvést např. charakteristiky osob a jejich statické rozdělení v modelu. Pokud model není schopen generovat statické rozdělení dle našich požadavků, znamená to, že nástroj neprošel verifikací. Verifikace nemá vztah k realitě – důležité jsou pouze požadavky uživatele [1].

Verifikaci lze provést různými způsoby, například kontrola modelu expertem, tvorba vývojových diagramů obsahujících každou možnou akci, nebo vyšetření výstupů modelu pro různé vstupní parametry [13].

#### 4.1.2 Kalibrace

Dalším krokem je kalibrace. Jedná se o proces, během kterého manipulujeme s jednotlivými parametry modelu tak, aby jeho chování co nejvíce odpovídalo modelovanému ději [14]. Jako konkrétní příklad můžeme uvést opět statistické rozdělení charakteristik osob. Během kalibrace modelu tyto parametry nastavíme obdobně, jako jsme sledovali v reálném případě. Správně kalibrovaný model se pak co nejvíce shoduje s realitou [1].

### 4.1.3 Validace

Posledním krokem je validace. Při ní ověřujeme shodu výsledků modelu a experimentálních dat odlišných od dat použitých pro jeho kalibraci. Tím zvýšíme kontrolu nad fungováním modelu. Může se totiž stát, že úpravou parametrů pro účely kalibrace nevědomky odchýlíme model od reality v jiných parametrech. Tyto odchylky poté odhalíme validací na jiných datech. Například tedy pro kalibraci použijeme střední rychlost pohybu a pro validaci maximální čas evakuace [1].

### 4.1.4 Standardizace procesu verifikace a validace modelu

V současné době existují 3 zahraniční předpisy jako základní zdroje informací pro proces verifikaci a validace modelu pohybu osob, které jsou vzájemně provázány. Jde o britskou směrnici IMO Guidelines 1238 z roku 2007, ze které částečně vychází německý standard RIMEA z roku 2009, a americký předpis NIST Technical Note z roku 2013. V rámci mezinárodní organizace ISO byla zahájena snaha o sjednocení standardů a vznik obecně závazné normy [1].

#### *IMO Guidelines 1238*

Tato britská směrnice vydaná International Maritime Organization slouží primárně pro analýzu evakuace osob z lodí. Je zde definována struktura reakční analýzy, informace o vstupních datech, reakční době a rychlosti pohybu, základní evakuační scénáře pro validaci modelů a vzorová analýza evakuace z lodí při různých počátečních hustotách [1].

#### *RIMEA*

Tato směrnice je základní dokument pro analýzy evakuace v Německu. Jde o komplexní směrnici pro modely a simulace pěšího pohybu [1].

#### *NIST Technical Note 1822*

Tato směrnice slouží jako základní dokument pro validaci a verifikaci modelů evakuace osob v USA. Není tak podrobný jako RIMEA, zaměřuje se spíše na akceptační kritéria protokolu prokazujícího verifikaci a validaci modelu [1].

#### *ISO/TC 92/SC 4/WG 7*

V současnosti probíhá v rámci mezinárodní organizace ISO, Technical Committee 92 Fire safety, Subcommittee 4 Fire safety engineering, Working Group 7 Assessment, verification and validation of fire models and computer codes, aktivita s cílem vytvoření jednotného mezinárodního standardu pro verifikaci a validaci modelů pohybu osob. Výsledný dokument by měl sjednocovat a rozšiřovat předchozí 3 základní dílčí směrnice [1].

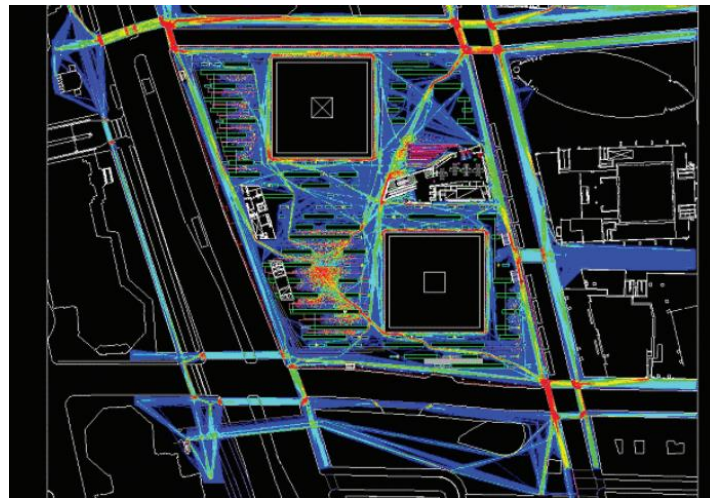
## 4.2 TECHNOLOGIE MODELŮ

Pohyb osob lze modelovat různými způsoby lišícími se zejména mírou přiblížení k realitě a použitou technologií. Každá technologie má své výhody a nevýhody, které je potřeba zvážit při jejich výběru.

### 4.2.1 Makroskopické modely

Makroskopické modely nahlíží na osoby jako na kontinuum, tedy nepracují s jednotlivci ale s osobami jako celkem. Tento celek se chová podle reálně naměřených hodnot nebo je

jeho chování založeno na analogii s fyzikálními jevy. Pracuje tedy se střední rychlostí pohybu v daném místě, hustotou osob nebo intenzitou jejich pohybu. Technologie makroskopických modelů je velice náročná a modely obsahují složité diferenciální rovnice. Proto nejsou vhodné pro simulace osob zejména v menším měřítku [1]. Využití makroskopických modelů je možné především v oblastech, které nejsou statisticky významné, nebo tam kde není nutné sledovat vzájemnou interakci jednotlivých osob. Výhodou je, že na rozdíl od mikroskopických modelů nejsou tak náročné na výpočetní kapacitu [15].

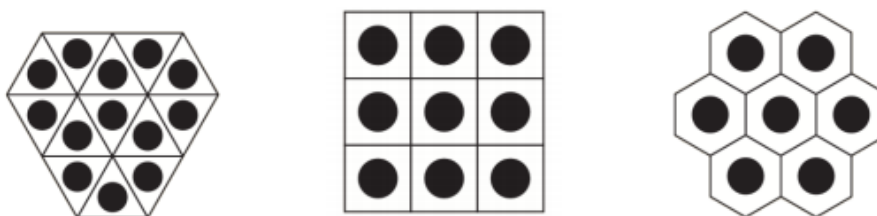


Obrázek 4.1 Makroskopický model pohybu osob [1]

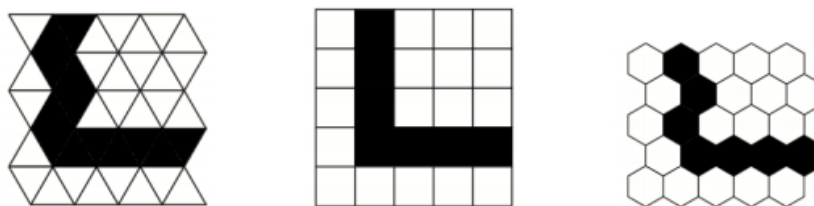
Na obrázku vidíme příklad makroskopického modelu osob. Jedná se o mapu zobrazující výsledky simulace pohybu chodců v okolí Národního památníku a muzea 11. září v New Yorku. Jednotlivé hustoty osob jsou barevně odlišeny.

#### 4.2.2 Celulární automaty

Celulární automat je typ fyzikálního modelu reálné situace, který slouží k časové i prostorové diskrétní idealizaci systémů, kde hodnoty veličin v průběhu času nabírají pouze diskrétních hodnot. Je tvořen pravidelnou strukturou buněk, nejčastěji čtvercovou mřížkou. Použit lze i trojúhelníkovou nebo šestiúhelníkovou mřížku. Tvar mřížky volíme podle tvaru překážek – obdélník je nejvhodnější pro přímé zdi, šestiúhelníky využijeme při překážkách nepravidelných tvarů. Jelikož osoby jsou často aproximovány jako kruh, šestiúhelník se také jeví jako nejvhodnější tvar pro jejich zobrazení. Trojúhelníková síť nemá oproti obdélníkům a šestiúhelníkům žádné výhody [16].

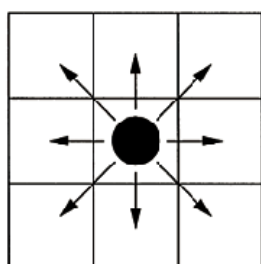


Obrázek 4.2 Rozdělení chodců do různých tvarů mřížek [16]



Obrázek 4.3 Zobrazení zdí v různých tvarech mřížek [16]

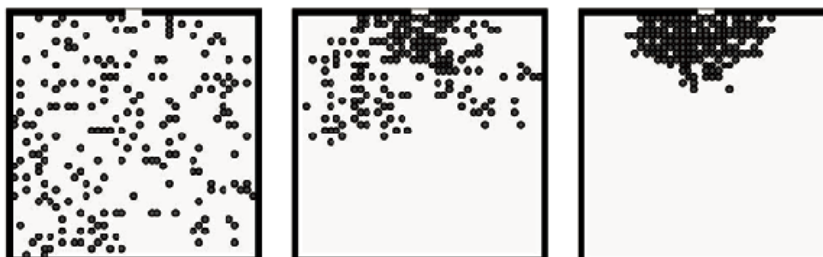
Každá buňka nabývá jeden z možných stavů. V případě modelu pohybu osob tedy buňka může být prázdná (bílá), či obsazena 1 osobou (černá). Více osob v 1 buňce být nemůže [1].



Osoba a možné směry jejího pohybu

$M_{-1,-1}$	$M_{-1,0}$	$M_{-1,1}$
$M_{0,-1}$	$M_{0,0}$	$M_{0,1}$
$M_{1,-1}$	$M_{1,0}$	$M_{1,1}$

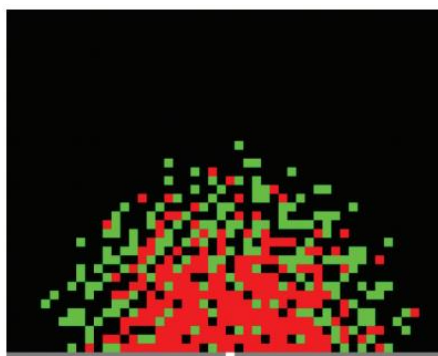
Matice pravděpodobnosti pohybu



Simulace pohybu osob opouštějících místnost 1 dveřmi

Obrázek 4.4 Schéma fungování celulárních automatů [17]

Rozdělení prostoru do jednotlivých buněk musí odpovídat reálným nárokům na prostor, který osoba požaduje. Pokud by buňky byly rozděleny příliš hrubě, nebylo možné dosáhnout realistické hustoty osob v kritických místech, naopak v případě příliš jemného rozdělení by výsledné hustoty byly příliš vysoké [1].



Obrázek 4.5 Model evakuace z místnosti s barevně rozlišenou lokální hustotou [1]

Nutné je definovat přechodová pravidla – tedy určit, kdy se prázdná buňka změní na obsazenou a naopak. Tato pravidla závisí na vlastnostech okolních buněk, např. na jejich obsazenosti. Výsledná simulace poté vytváří iluzi pohybu v prostoru [1].

Hlavní výhodou této metody je vysoká rychlost výpočtu, nicméně není příliš přesná z důvodu zjednodušení. Velkou nevýhodou je nemožnost modelování interakcí mezi jednotlivými agenty. Tato technologie se využívá například při modelování ucpávání průchodů nebo vlivu počtu dveří na plynulost evakuace.

### 4.2.3 Agentní technologie

Agentní technologie modelují přímo jednotlivé osoby jako samostatnou jednotku s jedinečnými fyzickými a psychickými vlastnostmi. Chování celého davu je poté ovlivněno vzájemnými interakcemi jednotlivců a jejich interakcemi s okolím. Tato metoda se tedy nesnaží popsat chování celého systému, ale modeluje chování jednotlivých osob [1].

Agentní technologie je nejmodernější a nejuvěrnější způsob přiblížení modelu k realitě. Výhodou je také snadná vizualizace reálného chování osob. Z toho důvodu se jedná o nejvíce využívanou technologii.



Obrázek 4.6 Model využívající agentní technologie [18]

## 4.3 VSTUPNÍ DATA

Pro tvorbu modelů a simulací potřebujeme určit vstupní data. Tato data se dělí na geometrii a populaci. Geometrie je většinou přesně daná, pouze upravujeme dílčí parametry, jako je například počet únikových východů. Parametry populace určujeme podle historických zkušeností nebo kvalifikovaného odhadu.

### 4.3.1 Geometrie

Geometrií modelu rozumíme stavební a prostorovou dispozici modelovaného objektu, tedy únikové a evakuační cesty, podlažnost, rozmístění překážek, stěn, průchodů a podobně. Jedná se tedy vlastně o plán oblasti řešeného objektu, kde se osoby pohybují. Zdrojem dat pro geometrii je v ideálním případě soubor ve formátu DXF (formát vyvinutý firmou Autodesk pro výměnu dat mezi AutoCADem a dalšími programy), který naimportujeme do nástroje, který používáme pro tvorbu modelu. Formát DXF je kompatibilní s většinou těchto běžně používaných nástrojů [1]. Před tvorbou samotné simulace je ovšem většinou u naimportované

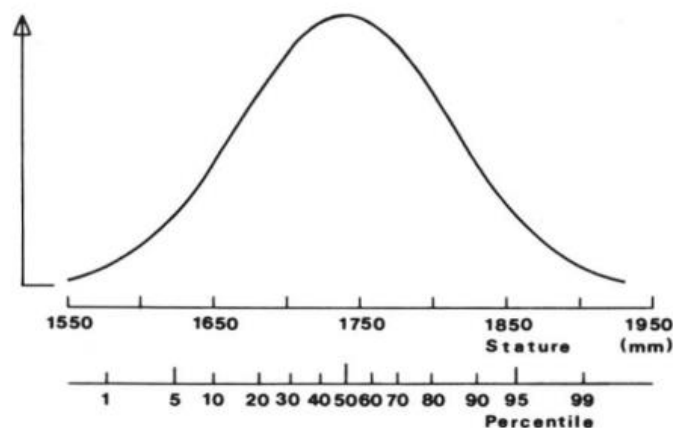
geometrie nutné přizpůsobit data pro daný účel a odstranit nadbytečné prvky, které by nám ztížily nebo znemožnily práci. Pokud nemáme k dispozici výkres s geometrickými daty, musíme geometrii vytvořit sami. Nástroje pro tvorbu modelů pohybu osob pro tyto případy mají vlastní prostředky pro vytvoření geometrie.

### 4.3.2 Populace

Populace v modelu má určité vlastnosti. Každou osobu musí být možné reprezentovat jako samostatnou entitu. Základní algoritmus pro jejich chování je pro všechny stejný, ale vlastnosti jedinců se upravují parametry tohoto algoritmu při definici populace nebo náhodně [1]. Trajektorie jednotlivých osob musí být možné vizualizovat a simulační krok (čas mezi jednotlivými aktualizacemi trajektorie) musí být vzhledem k celkovému času simulace malý [1].

#### *Velikost*

Jednou z vlastností, kterou musíme přiřadit k populaci, je velikost jednotlivých osob, tedy šířka, výška a hloubka. V předchozí kapitole jsme se touto vlastností zabývali, nyní musíme vyřešit jak ji aplikovat při tvorbě simulace. Existují dva způsoby – první možností je dát každé samostatné entitě vlastní rozměry z distribučního histogramu, druhou možností dát každé entitě stejnou velikost, buď průměrnou nebo největší hodnotu z distribučního histogramu. [8]



Obrázek 4.7 Frekvence výskytu osob různých výšek [8]

Pokud pracujeme s percentilem 95, testujeme při simulaci nejnáročnější limity prostředí. Mohou nastat situace, kdy jsou všechny osoby ještě větší, nicméně v běžných případech jako jsou návštěvníci sportovních utkání či pohyb osob ve veřejném prostoru, považujeme percentil 95 jako hraniční situaci [8].

#### *Věkové složení a pohlaví*

Dalším parametrem populace je věkové složení a pohlaví osob. Jestliže provádíme model pro akci, která se koná pravidelně, využijeme historická data z předchozích konání události. Další možností je kvalifikovaný odhad. Pokud nemáme jinou možnost, využijeme věkové rozložení standardní populace dle standardu RIMEA. Populaci uvažujeme rozdělenou na muže a ženy v poměru 1:1 s minimálním věkem 10 a maximálním 85 let. Střední hodnota věku je 50 let a směrodatná odchylka 20 let [1].



Obrázek 4.8 Věkové rozložení standardní populace [1]

### 4.3.3 Reakční doba

Reakční doba definuje dobu, za kterou konkrétní osoba zareaguje na signál pro evakuaci. Evakuaci dle směrnice RIMEA dělíme na 3 typy dle rychlosti [1]:

- Rychlá evakuace: Reakční doba všech osob je nulová. Podle české normy se uvažuje jen tento typ. Jedná se o extrémní variantu, při které dochází k vysokému zatížení únikových cest a východů.
- Plynulá evakuace: Reakční dobu pro všechny osoby rozdělíme rovnoměrně v intervalu 0-60 sekund.
- Pomalá evakuace: Reakční dobu pro všechny osoby rozdělíme rovnoměrně v intervalu závislejícím na typu budovy, charakteristice osob apod.

### 4.3.4 Rychlost pohybu

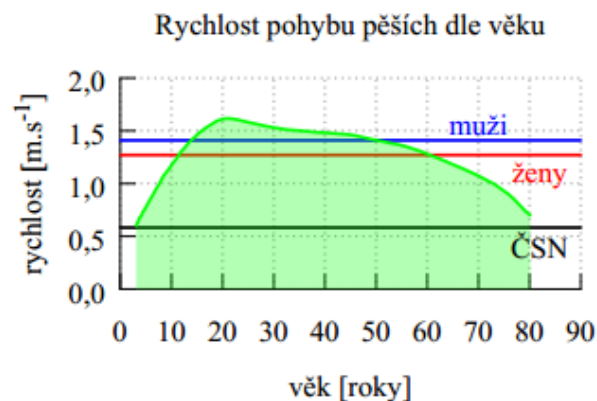
Pro určení rychlosti pohybu jednotlivých osob můžeme použít více zdrojů. Jednou z možností je norma ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb, která ovšem neuvažuje se závislostí rychlosti na věku. Osoby s omezenou schopností pohybu jsou započteny rozšířením únikového pruhu.

Únik	Rychlost pohybu [m/s]	Kapacita [osob/min]
Po rovině	0,583	40
Po schodech dolů	0,500	30
Po schodech nahoru	0,417	25

Tabulka 4.1 Rychlost pohybu a kapacita dle ČSN 73 0802 [19]

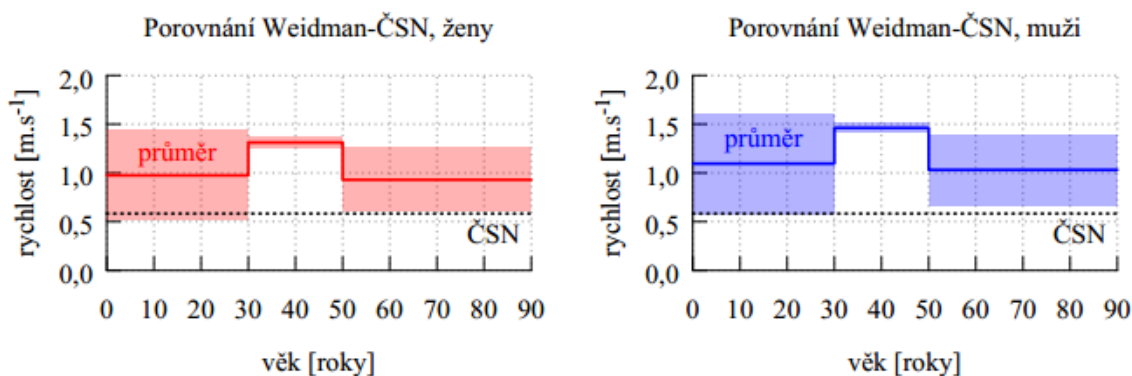
#### *Rychlost pohybu po rovině*

Podle práce Ulricha Weidmanna dosahuje střední rychlost pohybu po rovině pro muže 1,41 m/s a pro ženy 1,27 m/s [20].



Obrázek 4.9 Rychlost pohybu po rovině v závislosti na věku, porovnání s ČSN [1]

Z obrázku můžeme vyčíst, že Weidmannovy hodnoty jsou mnohem vyšší než hodnoty uvedené v ČSN, které jsou určeny spíše jako nejnižší možné minimum a jsou směřovány na stranu bezpečnou.

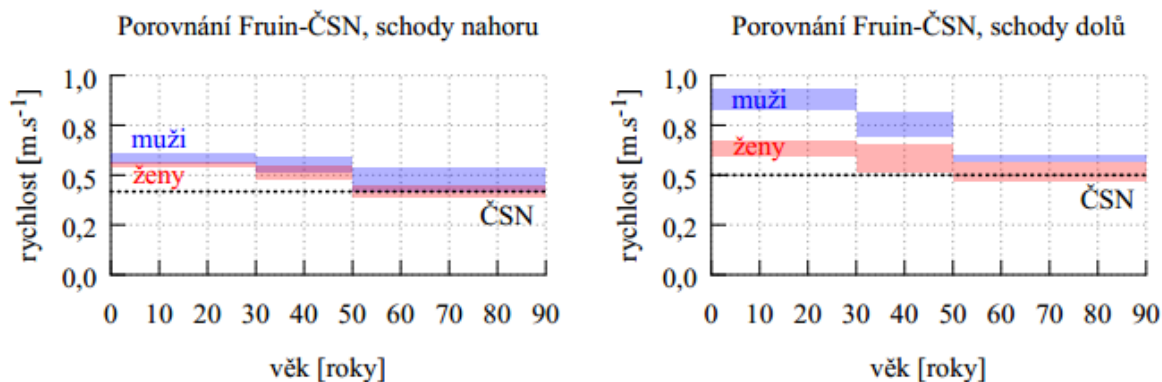


Obrázek 4.10 Porovnání rychlosti pohybu po rovině s ČSN podle pohlaví [1]

Z Weidmannových dat vyplývá, že nejvyšších průměrných rychlostí dosahují osoby ve věku od 30 do 50 let. Na obrázku vidíme rozptyl podle věku a porovnání s ČSN. Dále Weidmannova data stanovují hodnoty pro osoby se sníženou pohyblivostí. U žen dosahuje minimum 0,409 m/s a maximum 0,676 m/s, u mužů minimum 0,460 m/s a maximum 0,760 m/s [20].

### ***Rychlost pohybu po schodech***

Pro určení rychlosti pohybu po schodech jsou nejvhodnější data podle Fruina. Na rozdíl od Weinmanna, který při pohybu po rovině udává minimální a maximální rychlost, Fruin při pohybu po schodech udává průměrnou rychlost v závislosti na věku, pohlaví a sklonu schodiště [21].



Obrázek 4.11 Rychlost pohybu po schodech dle Fruina v porovnání s ČSN [1]

V grafech na obrázku 4.11 vidíme vyznačenu průměrnou rychlost pohybu po schodech o sklonu 27° a sklonu 32° pro různá pohlaví a směr pohybu. Rychlost pohybu podle těchto dat klesá s rostoucím věkem osoby. Hodnoty v ČSN jsou opět navrženy na stranu bezpečnou.

### 4.3.5 Volba trasy

Trasu osob definujeme staticky nebo dynamicky. Staticky znamená, že ručně každé modelované osobě nastavíme vstupní bod, jednotlivé body zájmu, cíle a podobně. Dynamická volba znamená, že nastavíme pouze vstupní a cílový bod a zbytek necháme na umělé inteligenci [1].

## 4.4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Závěrečnou fází modelování pohybu osob je analýza zjištěných výsledků. Na základě této analýzy poté navrhujeme příslušná opatření. Tato analýza je vzhledem ke komplexnosti problematiky kritickým bodem.

### 4.4.1 Obecná pravidla pro interpretaci výsledků

Při analýze výsledků je potřeba dodržet několik základních pravidel:

- Hodnoty na rozmezí vyhovujícího a nevhovujícího stavu je nutno stanovit předem, pokud není stanovena normou. Jestliže totiž tyto hodnoty autor stanoví až po dokončení modelu, má tendenci přizpůsobovat je výsledku modelu.
- Hodnoty dané modelem se vyskytují v určitém rozmezí okolo střední hodnoty. Pokud je to žádoucí, je nutné definovat střední hodnotu a směrodatnou odchylku opakovaným spuštěním simulace a sběrem výsledných dat [1].
- Pokud nejsou vstupní data pevně dána, musí opětovné spuštění simulace obsahovat stochasticky rozdělené vlastnosti populace [1].
- Pro statistickou analýzu výsledků je nutné spustit alespoň 10 nezávislých běhů simulace pro eliminaci stochastických jevů a identifikaci klíčových statistických parametrů.
- Výsledky je nutné srozumitelně dokumentovat, jak tabulkově tak graficky..

Jestliže výsledky modelu nevyhovují požadavkům, existuje několik možností jak dosáhnout korekce

- Změna geometrie (stavební úpravy, změna dispozice).
- Změna organizace (personál, navigační tabule, bezpečnostní opatření).

- Změna populace (omezení vstupu do určitých částí, omezení účelu budovy pouze pro určitou skupinu osob).

Tyto korekce využíváme zejména při posuzování projektové dokumentace. Výsledkem jsou poté doporučení pro úpravu dokumentace za účelem zlepšení bezpečnostních parametrů objektu.

## 4.5 SOFTWARE

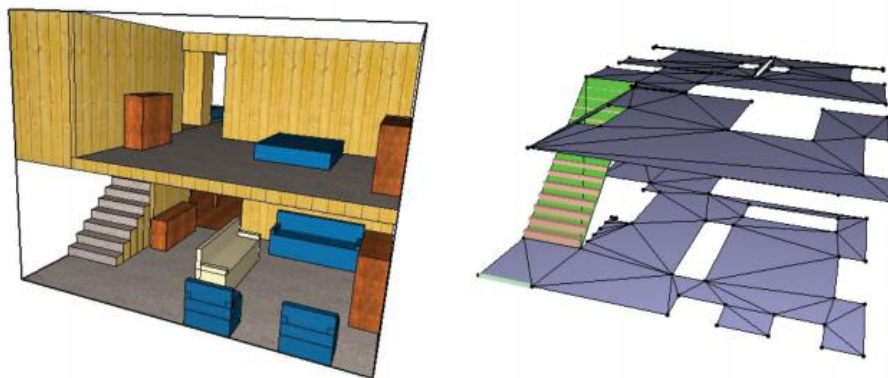
Pro modelování pohybu osob evidujeme přes 60 různých nástrojů. Univerzálně použitelných a stále aktivních a vyvíjených je nicméně méně než 10. Liší se od sebe použitou technologií modelu, definicí uzavřeného prostoru (kontinuální nebo diskrétní), definicí skupiny osob (homogenní nebo unikátní jedinci), jejich chování (deterministické, pravděpodobnostní nebo jejich kombinace) apod. [1]. Každý z nich je také charakteristický účelem, pro který byl vyvinut. Mezi standardně používané programy v inženýrské praxi patří Exodus, Pathfinder a VISWALK.

### 4.5.1 Pathfinder

Pathfinder je program vyvíjený společností Thunderhead Engineering Inc. využívající agentní technologii. Využívá se jak pro simulaci evakuací, tak volného pohybu osob. Neumožňuje přímo integrovat do modelu výsledky evakuace požáru nebo jiného rizika [1]. Umí tato data ale zpracovávat, a proto do něj lze importovat soubory získané z programů PyroSim a FDS.

#### *Modelování prostoru*

V Pathfinderu je modelovaný objekt vytvořen ve 3D a jednotlivá podlaží ve 2D rovině. Podlahová plocha je tvořena sítí na sebe navazujících trojúhelníků. Osoby se mohou pohybovat pouze po této síti, takže nepřístupná místa jsou definována prázdnou plochou. Pohyb osob mezi jednotlivými výškovými úrovněmi umožňují schodiště, rampy a výtahy. Ty jsou reprezentovány nakloněnou rovinou sítě a redukovanou rychlostí pohybu osob. Východy z objektu jsou umístěny na okraji výpočetní sítě a odebírají osoby ze simulace.



Obrázek 4.12 Příklad navigační sítě [1]

#### *Modelování osob*

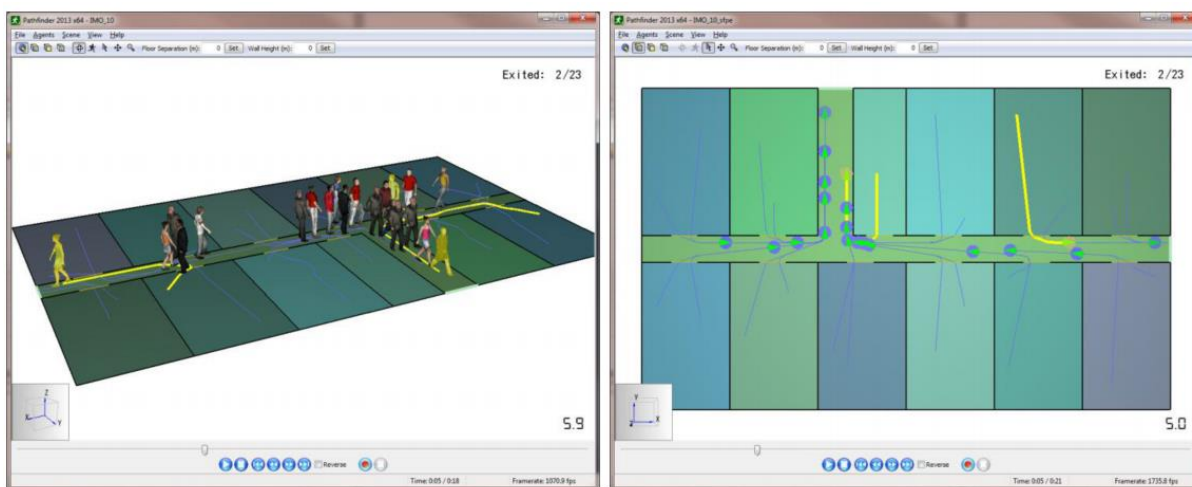
Chování osob v modelu je definováno řadou dílčích cílů, které vedou k dosažení hlavního cíle. Plánování trasy pohybu probíhá v několika krocích: definování dílčích cílů, zvolení nejbližšího dílčího cíle, splnění nejbližšího dílčího cíle. Osoby si volí vhodnou trasu podle

doby trvání a překonané vzdálenosti. Všechna kritéria lze ručně nastavit pomocí uživatelsky přiřazených koeficientů.

### **Technologie modelu**

Pathfinder při modelování pracuje se 2 základními přístupy: režim SPFE a režim Steering. Režim SPFE funguje na bázi hydraulického modelu proudění, kdy je pohyb osob ovlivněn hustotou osob v jednotlivých místnostech. Pro pohyb únikovými východy je pak určující jeho šířka. Přestože se tedy jedná o agentní model, jeho fundamentální principy jsou blízké makroskopickým modelům [1].

Režim Steering je založen na vybrání trajektorie pohybu a následném průběžném přehodnocování na základě situace. Tento režim často dává reálnější výsledky.



**Obrázek 4.13 Srovnání chování osob v režimu SPFE a režimu Steering [1]**

Na obrázku vidíme srovnání výsledků simulace pro identický problém. V režimu steering opustily modelované osoby prostor za 18 vteřin, v případě režimu SFPE byl evakuační čas o 4 vteřiny pomalejší zejména vinou fronty, která se utvořila u jednoho únikového východu. V režimu SFPE je totiž možnost vzájemného překrytí osob v prostoru zejména v místech vzniku front [1]. To způsobuje jiné výsledky. Režim steering lze tedy označit za pokročilejší a reálnější.

### **Hardwarové požadavky a výkon**

Hardwarové požadavky jsou srovnatelné s konkurencí.

Konfigurace	OS	Procesor	RAM	Grafika
Minimální	Windows 7 32 nebo 64 bit	Intel i5	4 GB	Open GL 1.2
Doporučená	Windows 7 64 bit	Intel i7	8 GB	Open GL 3.2

**Tabulka 4.2 Hardwarové a systémové požadavky pro Pathfinder 2018 [22]**

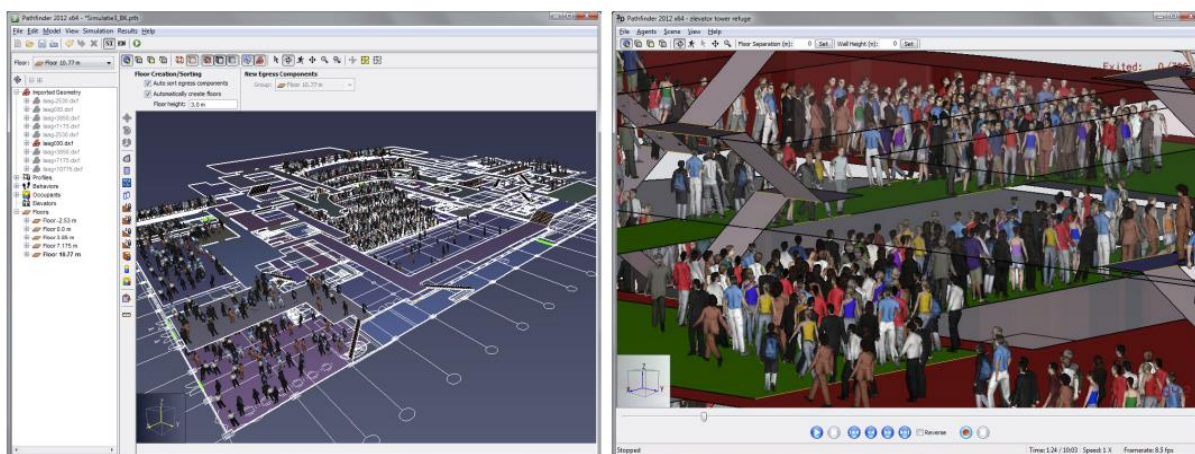
Rychlost zpracování simulace je rovněž srovnatelná s konkurenčním softwarem. V tabulce jsou výsledky pro jednoduchý model čtvercové plochy s celkem 50 000 agenty (koncert) a dále složitější importovaná geometrie z nástroje Revit, která obsahuje 3 000 agentů (vnitřní prostor výstaviště) [1].

Jádra	Frekvence	RAM	Počet osob a model	Simulace
4	2,6 GHz	8 GB	50 000, jednoduchá geometrie	18,2 min
4	2,6 GHz	8 GB	3 000, importovaná geometrie Revit	5 min

Tabulka 4.3 Srovnání výkonu nástroje Pathfinder pro různé typy modelu [1]

## Uživatelské prostředí

Pathfinder obsahuje uživatelské rozhraní, které umožňuje vytvořit model a jeho simulaci. Geometrii lze nainportovat ve formátu DXF. Pokud je to nutné, lze simulaci zobrazit v pokročilém 3D režimu.



Obrázek 4.14 Porovnání modelu divadla s importovanou grafikou ve formátu DXF a vizualizaci shromaždiště osob v pokročilém 3D zobrazení [1]

Kromě vizualizace nástroj také umožňuje zobrazit výsledky simulace v podobě grafů a textové podobě s možností exportu do formátu CSV.



Obrázek 4.15 Statistický výstup zachycující rychlost pohybu osob skrz jednotlivé východy [23]

## 4.5.2 VISWALK

VISWALK je software německé firmy PTV Group. VISWALK lze pořídit jako samostatný program, v tomto případě je vhodný pro analýzy pohybu pěších osob. Druhá

možnost je použít VISWALK jako přídatný modul programu VISSIM, což umožňuje nástroj využít i pro interakci chodců s vozidly. Tento program není primárně určen pro modely evakuací, ale pro pohyb osob mimo krizové situace na velkých prostranstvích. V omezené míře jej lze využít i k simulacím interiérů a hromadných událostí [1]. Neumožňuje integrovat do modelu výsledky simulace požáru a dalších rizik.

### ***Modelování osob***

Při modelování osob můžeme nastavit jejich vlastnosti jako velikost, parametry chování nebo dynamické vlastnosti. Při menším počtu agentů můžeme každé osobě nastavit cíl a určení konkrétních ploch pro průchod, při větším počtu osob pak pomocí matic definujících skupinové zdroje a cíle zůstává výběr trasy na vnitřní logice agenta [1]. Výběr trasy můžeme nastavit jako optimální, nejkratší, uživatelský nebo podmíněný. Vybraná trasa se průběžně automaticky mění podle aktuální situace.

### ***Technologie modelu***

Nástroj je založen na principech Helbingova modelu sociálních sil, který vychází z myšlenky modelování sil analogicky k Newtonově mechanice. Trajektorie osob je tvořena výslednicemi přitažlivých sil vytvářených cílem a odpudivých sil vytvářených ostatními osobami a překážkami [1].

### ***Hardwarové požadavky a výkon***

Hardwarové požadavky jsou srovnatelné s konkurencí. Dle výrobce je pro VISWALK optimální 32bitový operační systém.

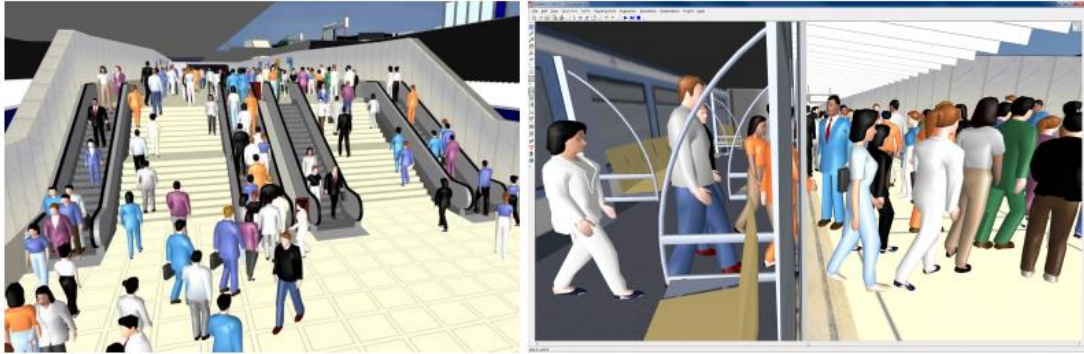
Konfigurace	OS	Procesor	RAM	Grafika
Minimální	Windows Vista	Pentium 4	2 GB	Open GL
Doporučená	Windows 8 32 bit	Intel i7	8 GB	Open GL, karta AMD Radeon

**Tabulka 4.4 Hardwarové a systémové požadavky pro VISWALK [1]**

Nástroj umožňuje v reálném čase simulaci pohybu až 100 000 osob. V experimentálních režimech, kdy je simulace výrazně pomalejší, je možné nasimulovat až miliony osob [1].

### ***Uživatelské prostředí***

Geometrii modelu lze naimportovat ve formátu DXF. Osoby se pohybují po plochách, které jsou ve výškových úrovních spojovány rampami. Plochy a rampy mohou obsahovat další objekty a informace ovlivňující chování chodců, např. informační tabule nebo zastávky MHD [1].



Obrázek 4.16 Modely v programu VISWALK - vlevo schodiště, vpravo vagón metra [1]

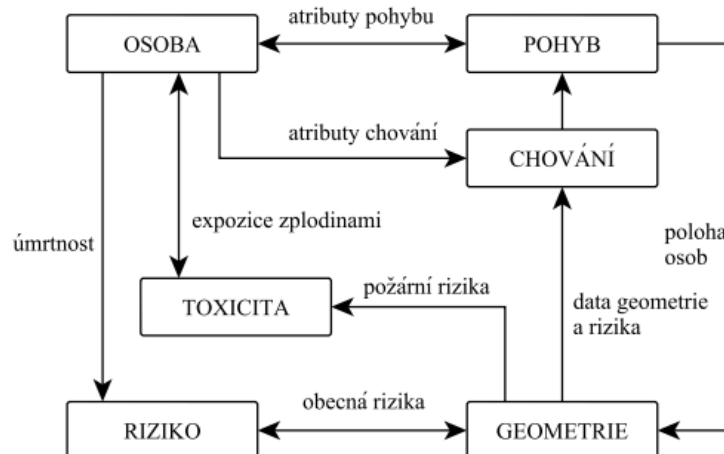
Výstupem simulace je cestovní čas, záznam každé osoby a jejího pohybu, hodnocení pěších front, identifikace kongescí a zobrazení LOS [1]. Simulaci lze zobrazit ve 2D nebo 3D animaci.

### 4.5.3 EXODUS

EXODUS je skupina nástrojů vyvíjená na University of Greenwich. Jeho součástí jsou samostatné nástroje pro evakuaci z konkrétních prostředí, např. z letadel, lodí nebo vlaků. Základní aplikací je buildingEXODUS (dále jen EXODUS). Tento program je určen pro simulace pohybu osoba a evakuaci z pozemních staveb. Jako jediný ze skupiny nástrojů EXODUS je dostupný pro komerční a akademické využití [1]. Na rozdíl od konkurenčního softwaru dokáže integrovat výsledky simulace požáru a dalších rizik přímo do modelu evakuace [1].

#### *Technologie modelu*

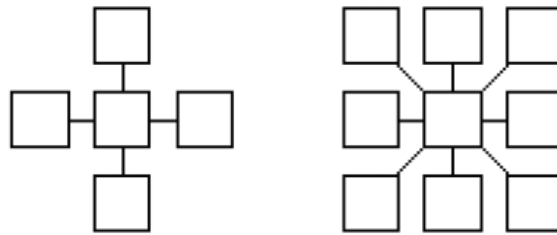
Nástroj pracuje se šesti submodely: Geometrie, Pohyb, Chování, Osoba, Riziko a Toxicita [1].



Obrázek 4.17 Schéma jednotlivých submodelů a jejich vzájemných vztahů [1]

Geometrii lze vytvořit několika způsoby: načíst prvky z knihovny objektů přímo v aplikaci, vytvořit přímo v aplikaci pomocí dostupných nástrojů nebo importovat ve formátu DXF, kdy je ovšem většinou nutné výkres dodatečně upravit, aby byl použitelný pro tvorbu simulace. Geometrie je tvořena sítí uzlů vzdálených od sebe 0,5 m, vzájemně propojených

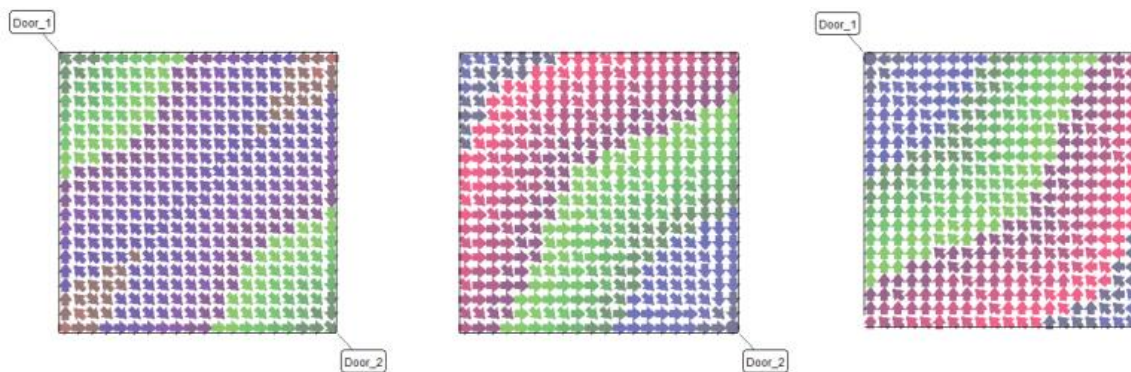
s ostatními uzly, z nichž každý může být obsazen pouze jednou osobou [1]. Tyto uzly mohou být propojeny různými způsoby definujícími pohyb osob mezi jednotlivými uzly. Tento systém připomíná technologii celulárních automatů, program ovšem funguje na principu agentní technologie.



**Obrázek 4.18 Příklad propojení jednotlivých uzlů [1]**

Model Pohyb řídí pohyb osob mezi jednotlivými uzly a čekání na uvolnění aktuálně obsazeného uzlu (např. fronty). Model kromě pohybu vpřed také zahrnuje komplikovanější manévry, jako např. předbíhání pomalejších osob rychlejšími [1].

Model Chování definuje chování jednotlivce na základně aktuální situace a vlastností daného agenta. Funguje na globální a lokální úrovni – globální definuje celkový cíl jednotlivce, např. kterým východem chce osoba odejít, lokální definuje reakci na situaci v bezprostředním okolí [1]. Pohyb osob je řízen tzv. potenciálovou mapou. Osoba vyhledává cestu k danému cíli tak, aby přecházela na uzel se stejným nebo nižším potenciálem. Na obrázku vidíme potenciálovou mapu v závislosti na počtu východů z místnosti. Východy jsou v nejnižším místě, zatímco nebezpečí v bodě nejvyšším.



**Obrázek 4.19 Potenciálová mapa [1]**

Model Osoba definuje jednotlivce jako souhrn pevně daných vlastností a proměnných hodnot, jako je pohlaví, věk, reakční doba, rychlost pohybu apod [1].

Model Riziko definuje riziko v případě požáru (vysoká teplota, kouř...) a kontroluje dostupnost a otevírání únikových východů [1].

Model Toxicita určuje vliv toxických látek na vlastnosti jednotlivých osob.

### ***Hardwarové požadavky a výkon***

Hardwarové požadavky jsou standardní, nástroj funguje na všech OS od Windows XP po Windows 10 ve 32 i 64 bitové verzi [24].

Komplexita problému	CPU	Rychlost	RAM	Disk
Malé a střední objekty, stovky agentů	Intel Pentium 4	1.5 GHz	1 GB	10 MB
Velké objekty, tisíce agentů	Intel Core Duo	2.5 GHz	6 GB	20 MB
Velmi velké objekty, desítky tisíc agentů	Intel Core i7	3 GHz	12 GB	100 MB

**Tabulka 4.5 Hardwarové požadavky nástroje EXODUS pro různé varianty modelu [1]**

Doba výpočtu a simulace závisí na složitosti problému a typu hardwaru. Jak můžeme vidět v následujících tabulkách, na dobu výpočtu jsou náročnější modely se složitější geometrií.

Jader	Frekvence	RAM	Načtení geometrie	Výpočet mapy	Simulace
6	3,2 GHz	32 GB	0,03 min	0,35 min	4,10 min
4	3,6 GHz	16 GB	0,03 min	0,37 min	4,23 min
2	3,3 GHz	8 GB	0,04 min	0,45 min	5,90 min
4	3,0 GHz	8 GB	0,05 min	0,95 min	13,25 min

**Tabulka 4.6 Benchmark nástroje EXODUS pro evakuaci 30 000 osob z místnosti o ploše 60 000 m<sup>2</sup> [1]**

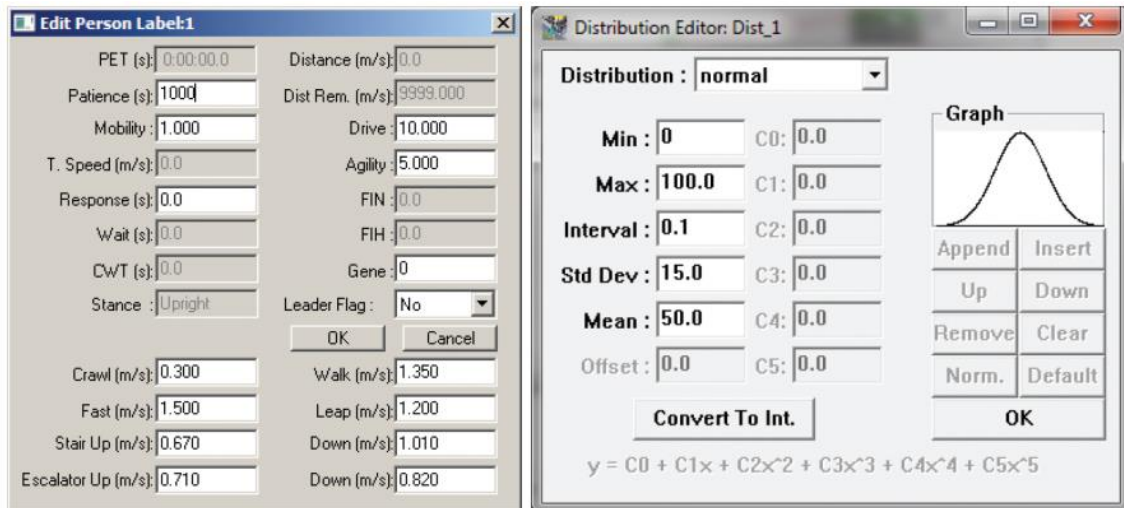
Jader	Frekvence	RAM	Načtení geometrie	Výpočet mapy	Simulace
6	3,2 GHz	32 GB	0,06 min	0,08 min	14,85 min
4	3,6 GHz	16 GB	0,06 min	0,08 min	16,52 min
2	3,3 GHz	8 GB	0,09 min	0,10 min	21,68 min
4	3,0 GHz	8 GB	0,12 min	0,27 min	38,70 min

**Tabulka 4.7 Benchmark nástroje EXODUS pro evakuaci 8120 osob z výškové budovy o 50 patrech a podlahové ploše 90 000 m<sup>2</sup> [1]**

Z tabulek je patrné, že největší vliv na dobu trvání má velikost RAM a poté frekvence procesoru. Počet jader nehraje prakticky žádnou roli.

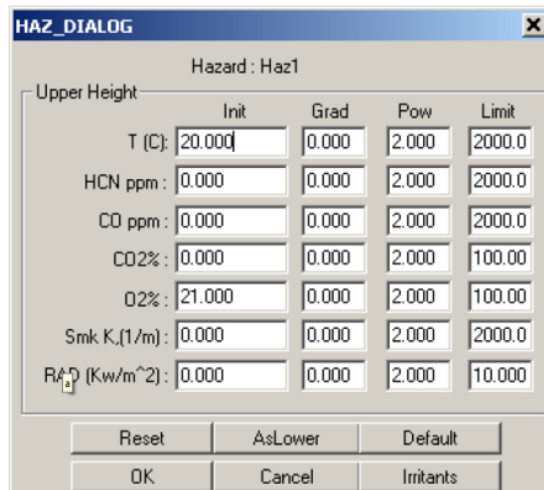
### ***Uživatelské prostředí***

EXODUS funguje ve 4 základních režimech – Geometrie, Populace, Scénář a Simulace. Po definování geometrie uživatel nastaví vlastnosti jednotlivých osob – lze editovat jednotlivce i statistické rozdělení parametrů pro celou skupinu [1].



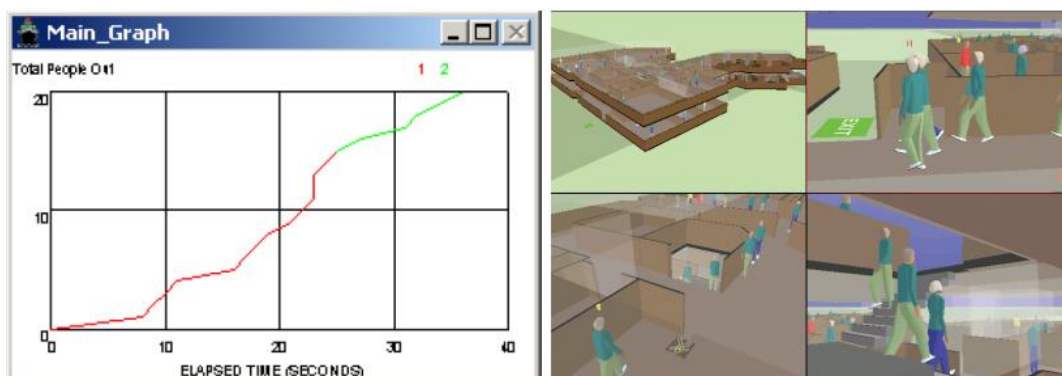
Obrázek 4.20 Nastavení vlastností jednotlivců a celých skupin osob [1]

V režimu Scénář nastavujeme konkrétní události, míru rizika, toxické látky, počet únikových východů apod.



Obrázek 4.21 Definice rizika v modelu [1]

Jako poslední využijeme režim Simulace. Výsledky můžeme zobrazit formou grafu nebo ve 3D vizualizaci, program také umožňuje uložení výstupů do samostatných datových souborů využitelných v jiném softwaru [1].



Obrázek 4.22 Výsledky simulace ve formě grafu a 3D vizualizace [1]

#### 4.5.4 Další software

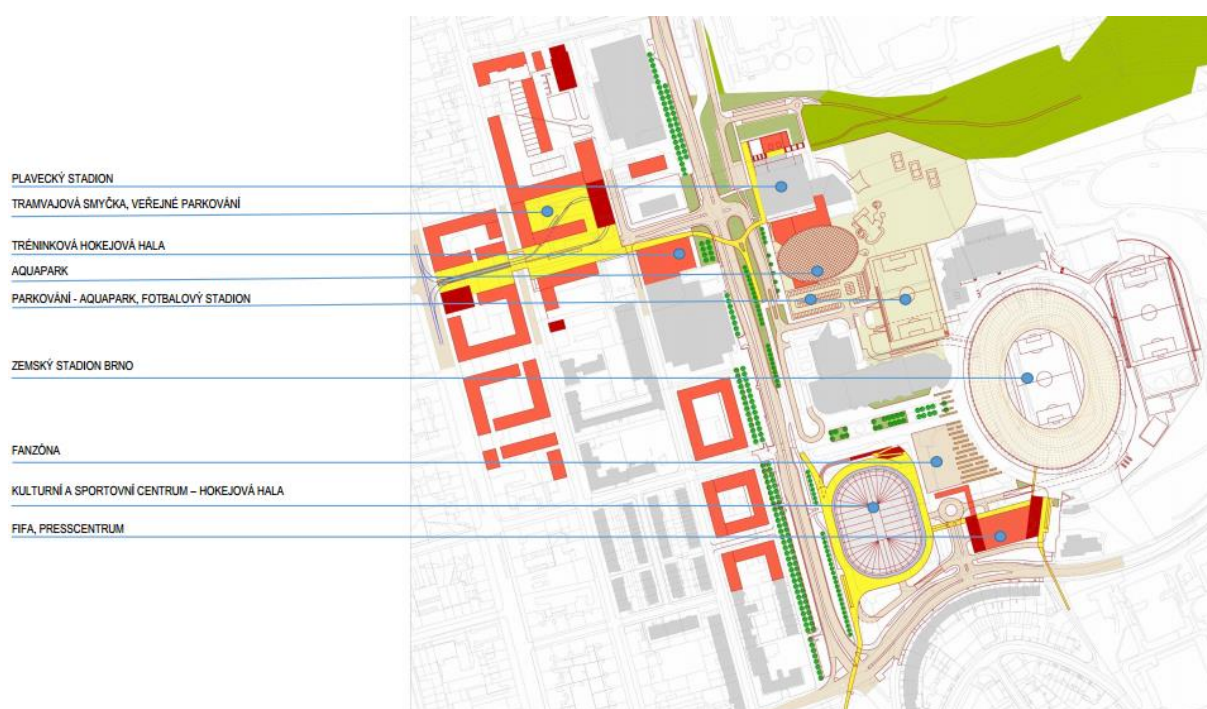
Mezi další doposud aktivní nástroje pro simulace pohybu osob patří např. FDS+ Evac pro simulaci požárů, Massive Insight používaný pro modelování davových filmových scén i pro komerční a experimentální činnost, MassMotion pro simulaci běžného pohybu, který je průběžně aktualizovaný a velmi propagovaný a zřejmě se brzy stane špičkou v oboru, nebo např. SMART Move – zásuvný modul pro Rhino 3D pro modelování běžného pohybu osob.

## 5 MODEL POHYBU OSOB – FOTBALOVÝ STADION BRNO

Model pohybu osob je vypracován pro nový Zemský fotbalový stadion v Brně. Nový fotbalový stadion je součástí územní studie připravovaných záměrů v areálu Ponava společně s Aquaparkem, Multifunkční halou a dalšími objekty. Cílem je analýza dopadu jednotlivých scénářů vyklizení stadionu, např. různé skladby diváků na dobu vyklizení, dobu zdržení apod.

### 5.1 POPIS OBLASTI

Zemský fotbalový stadion s kapacitou 30 000 diváků je navržen na místě stávajícího starého fotbalového stadionu Za Lužánkami. Plánovaná plocha funkčního využití celého stadionu je 50 850 m<sup>2</sup>. Dostupnost MHD bude řešena novou tramvajovou smyčkou. Pěší vazby jsou vyřešeny jako bezbariérové mezi fotbalovým stadionem, hokejovou halou, aquaparkem a tramvajovou smyčkou. Příjezd ke stadionu je přímo napojen na ulici Sportovní.



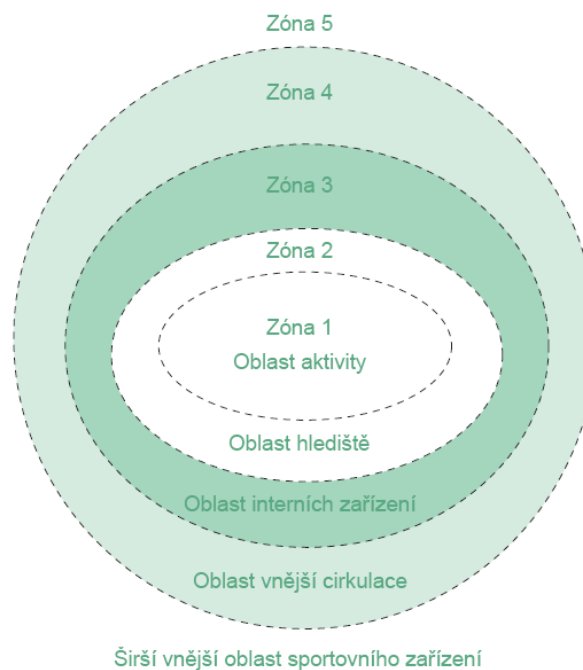
Obrázek 5.1 Územní studie areálu Ponava

S ohledem na parkování a bezpečnostní opatření se utkání na fotbalovém stadionu dělí na 3 kategorie: běžná utkání s návštěvností do 12 000 diváků, nadstandardní návštěva do 20 000 diváků (několikrát v roce), a mimořádná utkání s vyprodanou kapacitou stadionu. Hlavní příjezd ke stadionu je navržen s nájezdnou rampou pod objekt stadionu. Součástí stadionu je částečně zapuštěný objekt pro parkování a zázemí pro hostující fanoušky s odděleným podzemním koridorem pro vstup do jejich vyhrazeného sektoru hlediště.

Fotbalové stadiony se obvykle dělí do 5 zón:

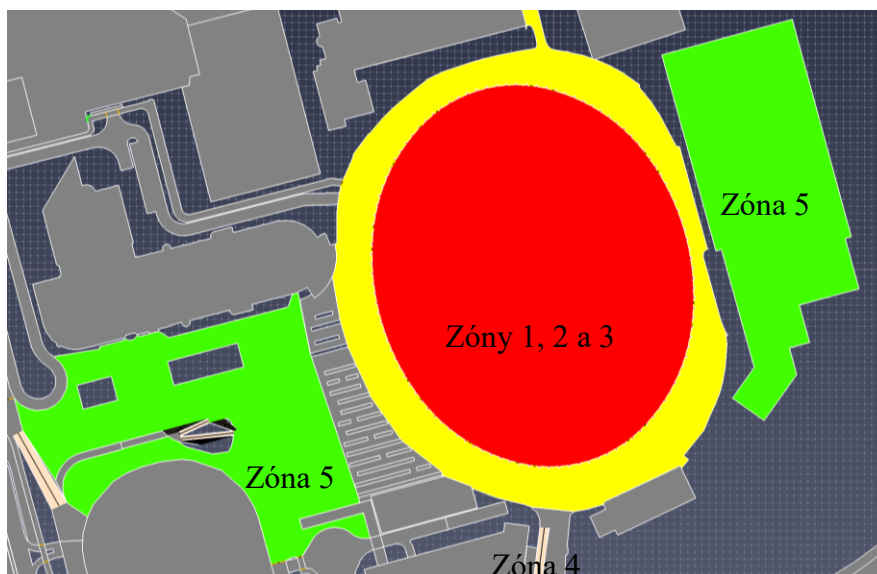
- Zóna 1, oblast aktivity: Jedná se o samotné hřiště. Tato zóna se může využít pro dočasnou evakuaci v případě, že nejsou okamžitě k dispozici evakuační trasy směrem mimo stadion.
- Zóna 2, oblast hlediště: Jedná se o tribuny. Návštěvníci jsou přednostně evakuováni směrem do zóny 3 a následně 4, v odůvodněných případech do zóny 1.

- Zóna 3, oblast interních zařízení: Jde o vnitřní část stadionu s technickým zázemím, stánky s občerstvením, toaletami apod. V případě evakuace jsou osoby z této zóny evakuovány přednostně směrem mimo stadion, tedy do zóny 4.
- Zóna 4, oblast vnější cirkulace kolem stadionu: Jde o primární rozptylovou plochu pro evakuaci v těsném okolí stadionu, která musí být současně přístupná složkám IZS. Následně probíhá evakuace do bezpečného prostoru v navazující zóně.
- Zóna 5, širší vnější oblast sportovního zařízení: Jde o širší okolí stadionu a musí být uvažováno jako bezpečný prostor pro evakuaci. Na tento prostor jsou následně napojeny okolní komunikace, trasy směrem k zastávkám hromadné dopravy, parkovištím apod.



**Obrázek 5.2 Zonální členění fotbalového stadionu a jeho okolí**

Na následujícím obrázku vidíme vyznačeny tyto zóny na Zemském stadionu Brno. Zóny 1, 2 a 3 jsou vnitřní oblast stadionu, zóna 4 oblast těsně okolo stadionu s přístupem k jednotlivým vchodům. Do zóny 5 spadá západně od stadionu oblast fanzóny, na východní straně stadionu tréninkové hřiště. Z této zóny bude případná evakuace probíhat dále směrem k parkovištím, zastávkám MHD a ostatním komunikacím.



Obrázek 5.3 Zóny na Zemském fotbalovém stadionu

## 5.2 APLIKOVANÝ MODEL POHYBU OSOB

Pro model pohybu osob byl použit program Pathfinder 2018. Geometrie byla importována ve formátu DXF z výkresové dokumentace. U modelu byly analyzovány dopady parametrických změn – skladby diváků a uzavření únikových východů. Pro jednotlivé varianty byla měněna vstupní data a následně statisticky vyhodnoceny výsledky.

## 5.3 ANALÝZA DOPADU RŮZNÉ SKLADBY DIVÁKŮ

Při analýze dopadu skladby diváků byla měněna rychlost pohybu a reakční doba. Zvoleny byly 3 varianty – podle ČSN 73 0802, mladé publikum ve věku do 50 let a publikum starší 50 let a porovnán vliv vstupních parametrů na celkovou dobu vyklizení, případně vliv v dalších oblastech.

### 5.3.1 Varianta 1 – ČSN

První variantou je vyklizení stadionu s použitím dat převzatých z normy ČSN 73 0802.

#### *Vstupní data*

Norma ČSN neuvažuje s rychlostí pohybu v závislosti na pohlaví nebo věku, hodnoty jsou pevně dány. Reakční doba je uvažována jako nulová.

RYCHLOST POHYBU	
Směr pohybu	Rychlost [ $m \cdot s^{-1}$ ]
Po rovině	0,583
Po schodech nahoru	0,500
Po schodech dolů	0,417

Tabulka 5.1 Varianta 1 – rychlost pohybu

Reakční doba [s]	0
------------------	---

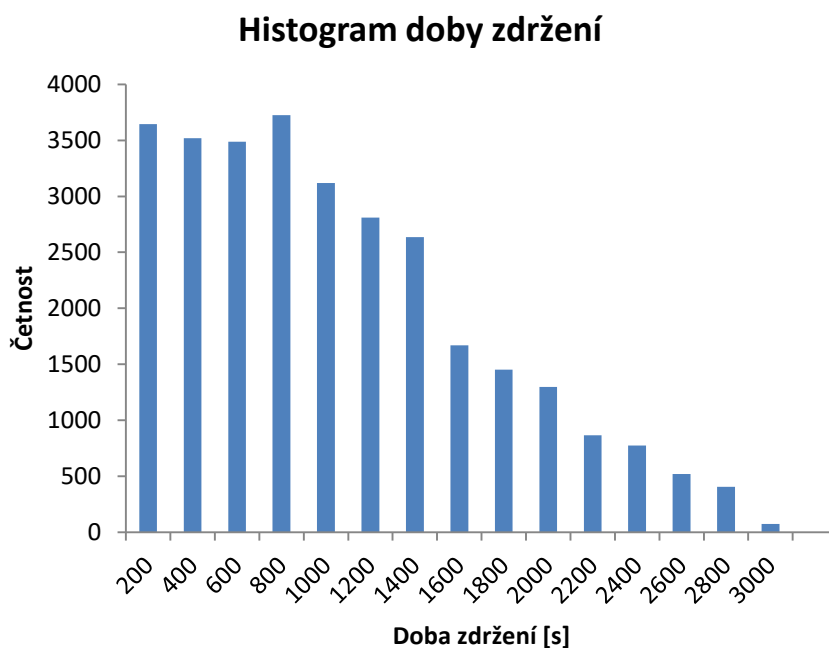
**Tabulka 5.2 Varianta 1 - reakční doba**

### ***Vyhodnocení***

Simulace byla spuštěna celkem 8x z důvodu eliminace statistických chyb.

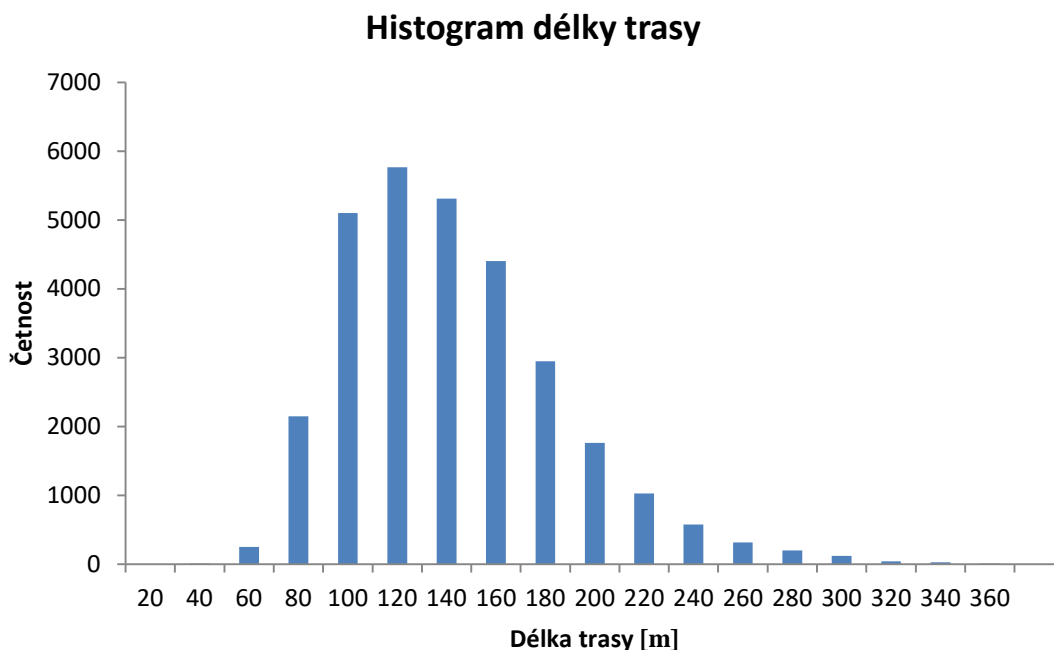
Statistické vyhodnocení doby vyklizení stadionu je následující: střední hodnota 3131,63 s, medián 3136,4 s, směrodatná odchylka 11,87 s, a 95procentní kvantil je 3139 s. Z toho vyplývá, že se jedná o symetrické rozdělení.

Dobu zdržení a délku trasy vidíme v následujících histogramech:



**Obrázek 5.4 Varianta 1 - histogram doby zdržení**

Doba zdržení se u této varianty nejčastěji pohybuje od 200 do 1400 sekund. Menší počet osob stojí ve frontě v rozmezí 1600 až 2800 sekund, minimum návštěvníků až 3000 sekund.



Obrázek 5.5 Varianta 1 - histogram délky trasy

Nejčastější délka trasy návštěvníků se nachází v rozmezí 100 až 200 m, s tím že minimální množství osob urazí pouze 40 až 60 m, či naopak až přes 300 m.

### 5.3.2 Varianta 2 – mladé publikum

Druhá experimentální varianta počítá s návštěvníky ve věku 0 – 50 let.

#### *Vstupní data*

Data pro rychlost pohybu jsou založena na Weidmanových datech, reakční dobu uvažujeme podle práce C.G. Hopkinsa analyzující evakuaci divadla [25].

RYCHLOST POHYBU				
Směr pohybu	Minimum [m.s <sup>-1</sup> ]	Maximum [m.s <sup>-1</sup> ]	Střední hodnota [m.s <sup>-1</sup> ]	Směrodatná odchylka [m.s <sup>-1</sup> ]
Po rovině	0,516	1,61	1, 50	0,32
Po schodech nahoru	Konstantní – zlomek 0,44 z rychlosti na rovině			
Po schodech dolů	Konstantní – zlomek 0,64 z rychlosti na rovině			

Tabulka 5.3 Varianta 2 - rychlost pohybu

REAKČNÍ DOBA			
Minimum [s]	Maximum [s]	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]
4,1	83,4	57,3	24,5

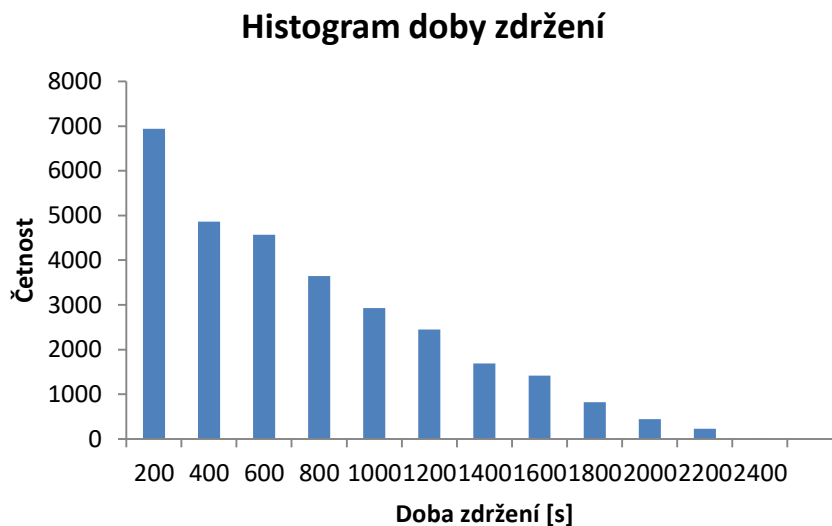
Tabulka 5.4 Varianta 2 - reakční doba

## Vyhodnocení

Simulace byla spuštěna celkem 5x z důvodu eliminace statistických chyb.

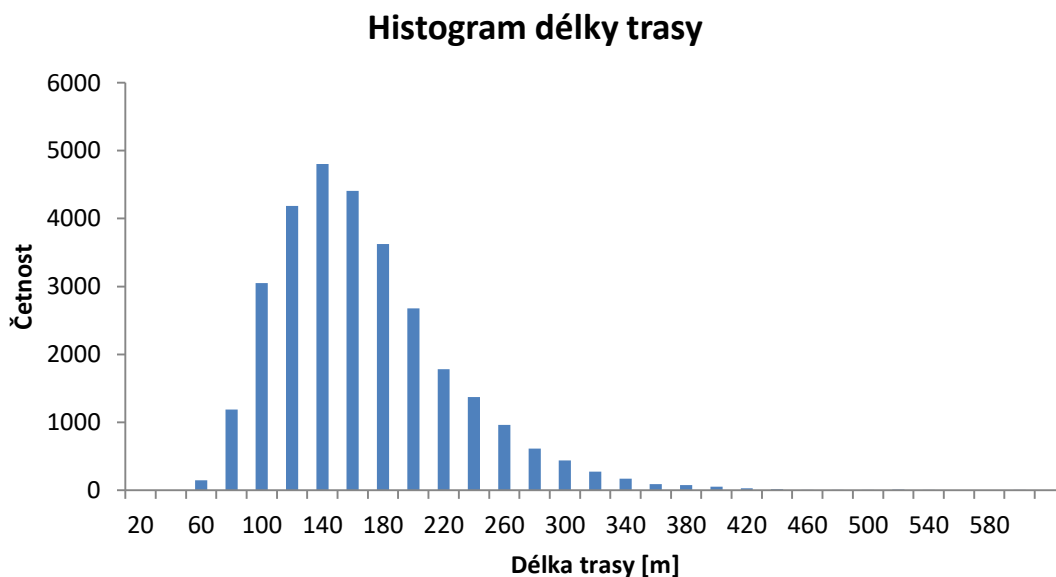
Statistické vyhodnocení doby vyklizení stadionu je následující: střední hodnota 2463,6 s, medián 2466,1 s, směrodatná odchylka 6,68 s, a 95procentní kvantil je 2470,26 s. Z toho vyplývá, že se jedná o symetrické rozdělení.

Dobu zdržení a délku trasy vidíme v následujících histogramech:



Obrázek 5.6 Varianta 2 - histogram doby zdržení

Největší počet návštěvníků se zdrží ve frontách pouze okolo 200 sekund, velký počet osob se rovněž zdrží v rozmezí mezi 400 až 1200 vteřinami. Maximální doba zdržení dosahuje u minimálního počtu jedinců až 2400 sekund.



Obrázek 5.7 Varianta 2 - histogram délky trasy

Délka trasy je nejčastěji v intervalu od 100 do 200 m. Minimální hodnota je okolo 60 m, v rozmezí od 300 do 600 m se pohybuje pouze zlomek návštěvníků, maximum u několika jedinců dosahuje až téměř 600 m.

### 5.3.3 Varianta 3 – staré publikum

Třetí experimentální varianta uvažuje s návštěvníky staršími 50 let.

#### *Vstupní data*

Vstupní data využíváme ze stejných zdrojů jako u předchozí varianty.

RYCHLOST POHYBU				
Směr pohybu	Minimum [m.s <sup>-1</sup> ]	Maximum [m.s <sup>-1</sup> ]	Střední hodnota [m.s <sup>-1</sup> ]	Směrodatná odchylka [m.s <sup>-1</sup> ]
Po rovině	0,605	1,392	1,2	0,23
Po schodech nahoru	Konstantní – zlomek 0,42 z rychlosti na rovině			
Po schodech dolů	Konstantní – zlomek 0,57 z rychlosti na rovině			

Tabulka 5.5 Varianta 3 - rychlost pohybu

REAKČNÍ DOBA			
Minimum [s]	Maximum [s]	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]
4,1	83,4	57,3	24,5

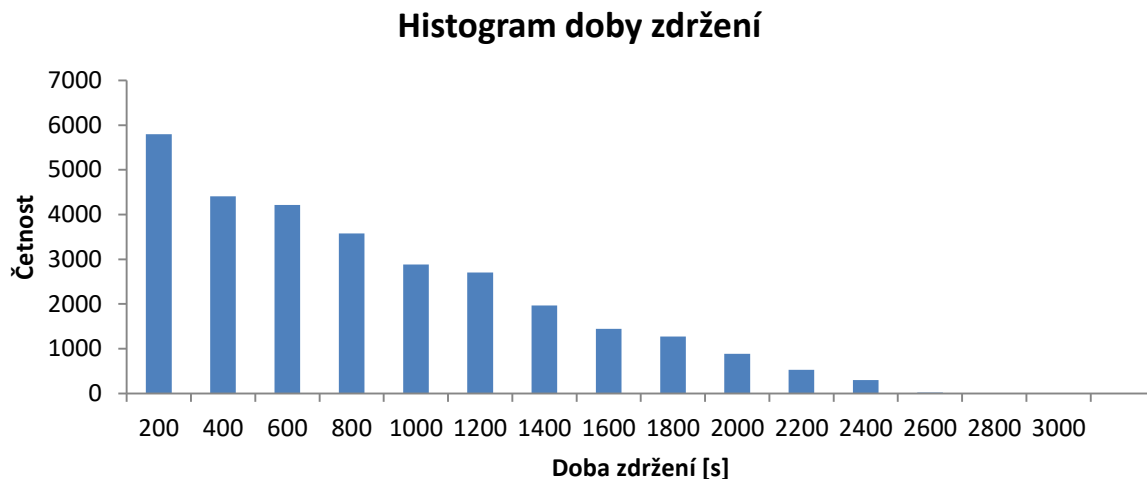
Tabulka 5.6 Varianta 3 - reakční doba

#### *Vyhodnocení*

Simulace byla spuštěna celkem 5x z důvodu eliminace statistických chyb.

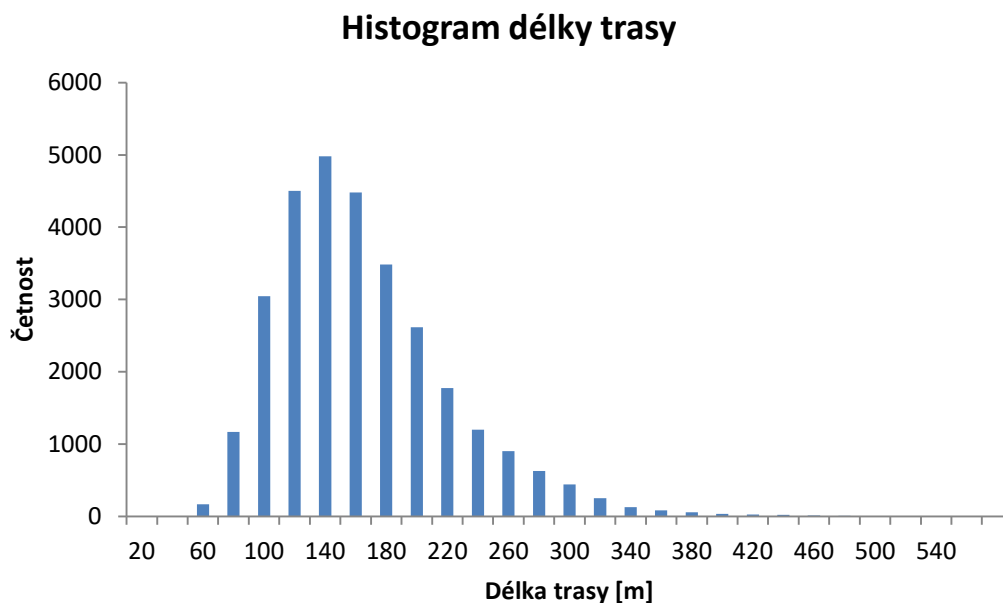
Statistické vyhodnocení doby vyklizení stadionu je následující: střední hodnota 2737,14 s, medián 2738,1 s, směrodatná odchylka 6,33 s, a 95procentní kvantil je 2743,26 s. Z toho vyplývá, že se jedná o symetrické rozdělení.

Dobu zdržení a délku trasy vidíme v následujících histogramech:



**Obrázek 5.8 Varianta 3 - histogram doby zdržení**

Doba zdržení nejčastěji dosahuje okolo 200 sekund, četnost výskytu jednotlivých dob postupně klesá až ke 2400 sekund. Minimální počet návštěvníků překročí tuto dobu zdržení, maximem je 3000 sekund.



**Obrázek 5.9 Varianta 3 - histogram délky trasy**

Délka trasy je prakticky stejná jako u předchozí varianty, nejčastější délka dosahuje 100 až 200 m, minimum 60 metrů a maximum až 560 m.

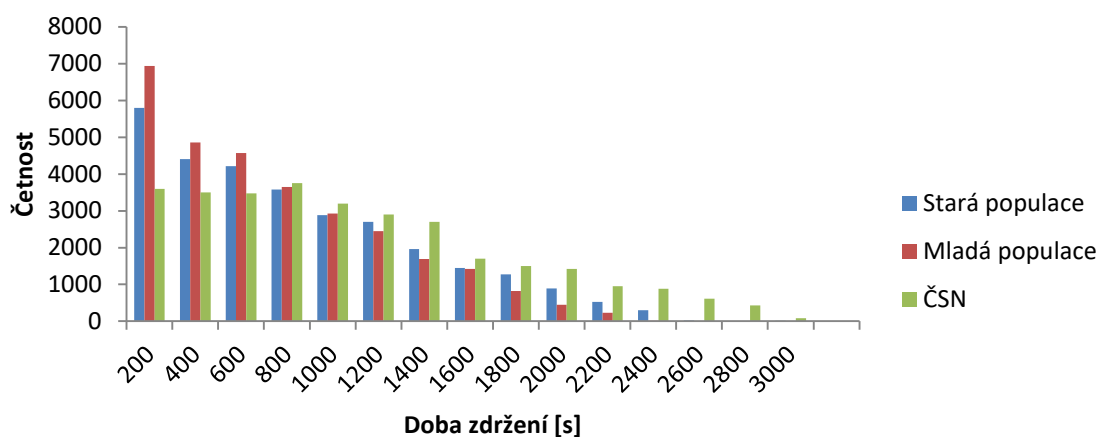
### 5.3.4 Porovnání jednotlivých variant

Varianta	Doba vyklizení
ČSN	3131,63 s
Mladá populace	2463,6 s
Stará populace	2737,14 s

**Tabulka 5.7 Porovnání doby vyklizení**

Z posuzovaných variant je co se týká doby vyklizení jednoznačně nejdelší varianta podle ČSN. To je způsobeno jednak nízkou rychlostí pohybu, která je v normě posunuta silně na stranu bezpečnou, a rovněž nulovou reakční dobou, která způsobuje tvorbu front u východů. Při porovnání mladé a staré populace zjistíme, že v případě mladých návštěvníků dojde k vyklizení stadionu přibližně o necelých 5 minut dříve. Rozdíl není tak výrazný z toho důvodu, že v mladé populaci mají zastoupení i malé děti, jejichž rychlost je ještě nižší než rychlost starých osob. Tím se částečně kompenzuje rozdíl v rychlosti a rozdíl mezi jednotlivými variantami není tak markantní.

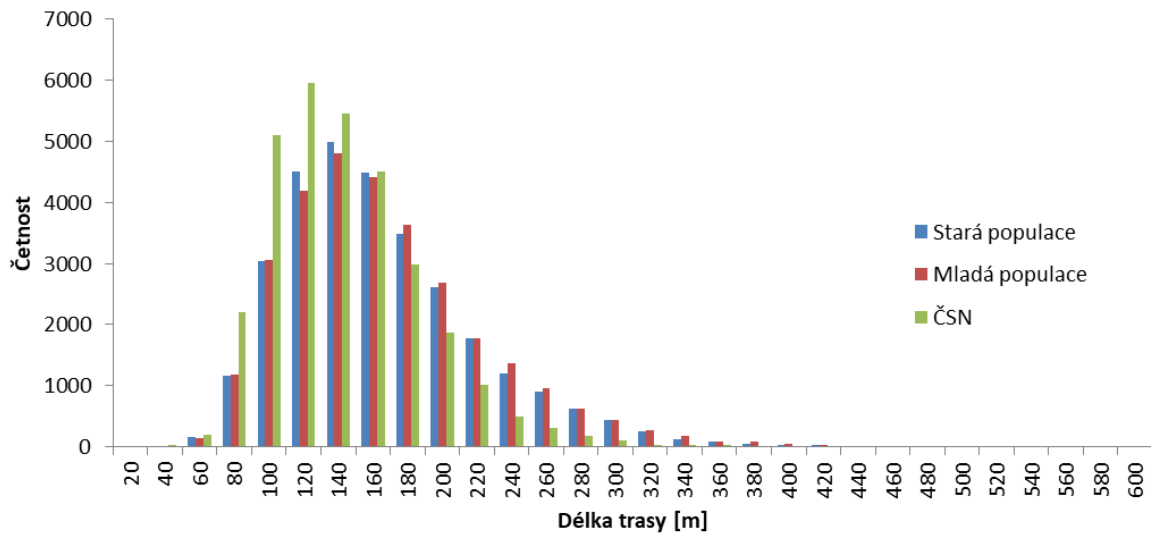
#### Porovnání doby zdržení



**Obrázek 5.10 Porovnání doby zdržení**

Největší doba zdržení je rovněž u varianty ČSN, což je také způsobeno nulovou reakční dobou a s tím související tvorbou front. Varianta s mladou populací má o něco nižší dobu zdržení než varianta staré populace. To je způsobeno o něco vyšší rychlostí pohybu a s tím souvisejícím rychlejším vyklizením a menší dobou zdržení ve frontě.

## Porovnání délky trasy



Obrázek 5.11 Porovnání délky trasy

Délka trasy u variant staré a mladé populace je téměř stejná. U ČSN je délka trasy kratší, což je způsobeno nulovou reakční dobou. Tím, že všechny osoby vyšly k cíli ve stejnou dobu, nedocházelo k situacím, kdy osoby, které již zareagovaly, musely vybírat delší trasu z důvodu zablokování cesty zatím nereagujícími návštěvníky.

### 5.4 ANALÝZA DOPADU UZAVŘENÍ ÚNIKOVÝCH VÝCHODŮ

Při této analýze byl testován vliv uzavření východů v důsledku např. požáru nebo útoku. Celkový počet východů na stadionu je 18. Analyzovány byly 2 varianty – uzavření 2 nejpoužívanějších východů na stejné straně stadionu a nejpoužívanějších východů na protějších stranách a následné vyhodnocení a porovnání výsledků.



Obrázek 5.12 Schéma únikových východů

### Vstupní data

Pro tuto analýzu byly u obou variant použity stejná vstupní data jako pro analýzu mladé populace, viz následující tabulky.

RYCHLOST POHYBU				
Směr pohybu	Minimum [m.s <sup>-1</sup> ]	Maximum [m.s <sup>-1</sup> ]	Střední hodnota [m.s <sup>-1</sup> ]	Směrodatná odchylka [m.s <sup>-1</sup> ]
Po rovině	0,516	1,61	1, 50	0,32
Po schodech nahoru	Konstantní – zlomek 0,44 z rychlosti na rovině			
Po schodech dolů	Konstantní – zlomek 0,64 z rychlosti na rovině			

Tabulka 5.8 Analýza uzavření východů - rychlost pohybu

REAKČNÍ DOBA			
Minimum [s]	Maximum [s]	Střední hodnota [s]	Směrodatná odchylka [s]
4,1	83,4	57,3	24,5

Tabulka 5.9 Analýza uzavření východů - reakční doba

### 5.4.1 Varianta 1 – východy naproti sobě

Pro tuto variantu bylo zvoleno uzavření dvou nejvíce používaných východů na protějších stranách stadionu, tedy východů 4 a 12.



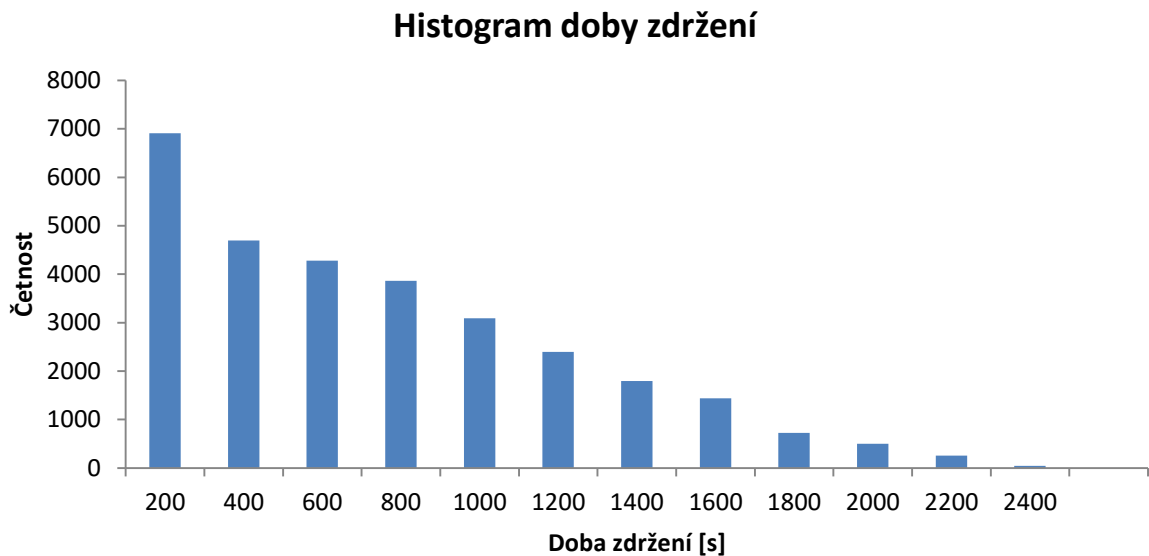
Obrázek 5.13 Varianta 1 - schéma únikových východů

### *Vyhodnocení*

Simulace byla spuštěna celkem 5x z důvodu eliminace statistických chyb.

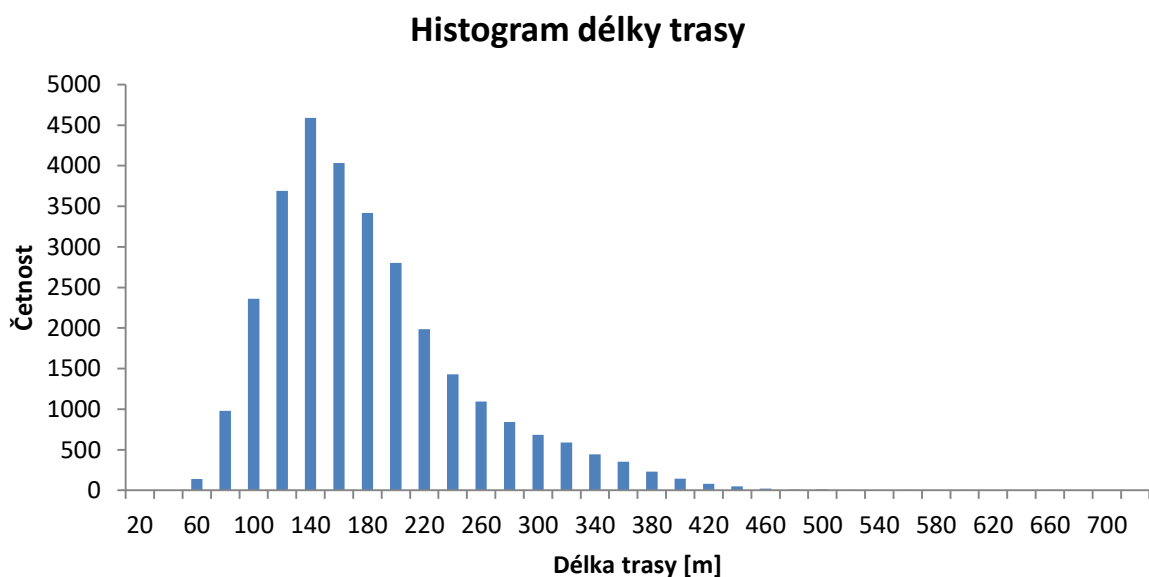
Statistické vyhodnocení doby vyklizení stadionu je následující: střední hodnota 2592,06 s, medián 2591,2 s, směrodatná odchylka 8,43 s, a 95procentní kvantil je 2604,08 s. Z toho vyplývá, že se jedná o symetrické rozdělení.

Dobu zdržení a délku trasy vidíme v následujících histogramech:



**Obrázek 5.14 Varianta 1 - histogram doby zdržení**

Doba zdržení přibližně odpovídá variantě s otevřenými východy. Největší počet návštěvníků čeká pouze do 200 sekund, četnost postupně klesá k hodnotě 2000 sekund. Maximální doba zdržení je až 2400 sekund.



**Obrázek 5.15 Varianta 1 - histogram délky trasy**

Největší počet návštěvníků urazí mezi 100 až 250 metry. Minimální počet ujede jen okolo 60 m či až hodnoty mezi 400 až 660 metry.

## 5.4.2 Varianta 2 – východy na stejné straně

Pro tuto variantu bylo zvoleno uzavření dvou nejvíce používaných východů na stejné straně stadionu, tedy východů 1 a 4.



Obrázek 5.16 Varianta 2 - schéma únikových východů

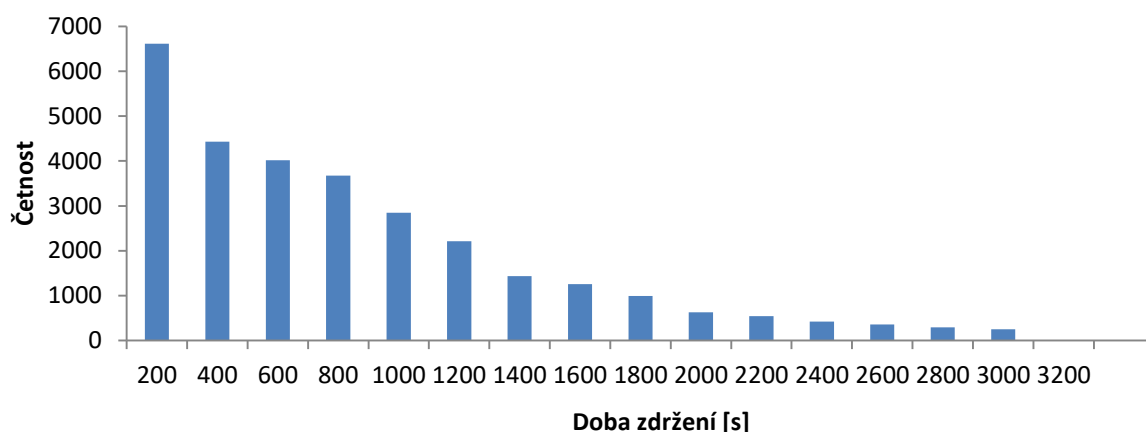
### Vyhodnocení

Simulace byla spuštěna celkem 5x z důvodu eliminace statistických chyb.

Statistické vyhodnocení doby vyklizení stadionu je následující: střední hodnota 3392,04 s, medián 3395,6 s, směrodatná odchylka 7,09 s, a 95procentní kvantil je 3400,08 s. Z toho vyplývá, že se jedná o symetrické rozdělení.

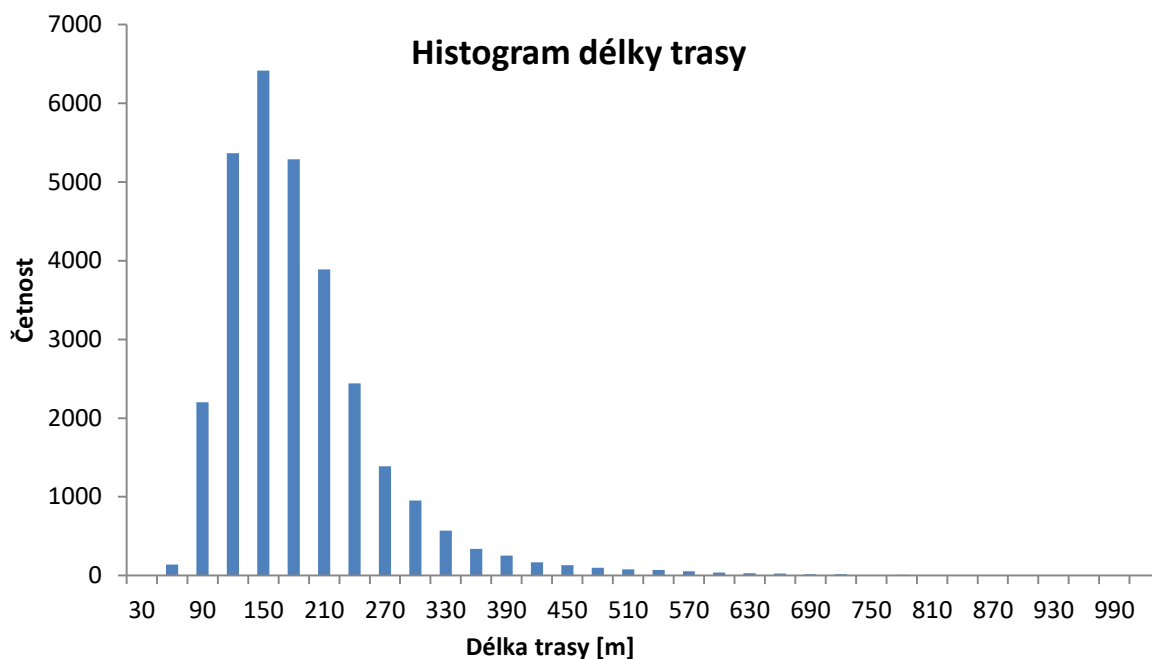
Dobu zdržení a délku trasy vidíme v následujících histogramech:

### Histogram doby zdržení



Obrázek 5.17 Varianta 2 - histogram doby zdržení

Průběh doby zdržení je podobný jako u předchozí varianty, největší počet návštěvníků čeká do 200 sekund. Pouze maximální hodnota dosahuje až přes 3200 sekund.



Obrázek 5.18 Varianta 2 - histogram délky trasy

Největší počet návštěvníků urazí mezi 90 a 270 metry. Minimum je opět okolo 60 m, někteří jedinci ujdou vzdálenost až 990 metrů.

### 5.4.3 Porovnání jednotlivých variant

Varianta	Doba vyklizení
Otevřeny všechny východy	2463,6 s
Uzavřeny 2 východy naproti sobě	2592,06 s
Uzavřeny 2 východy na stejné straně	3392,04 s

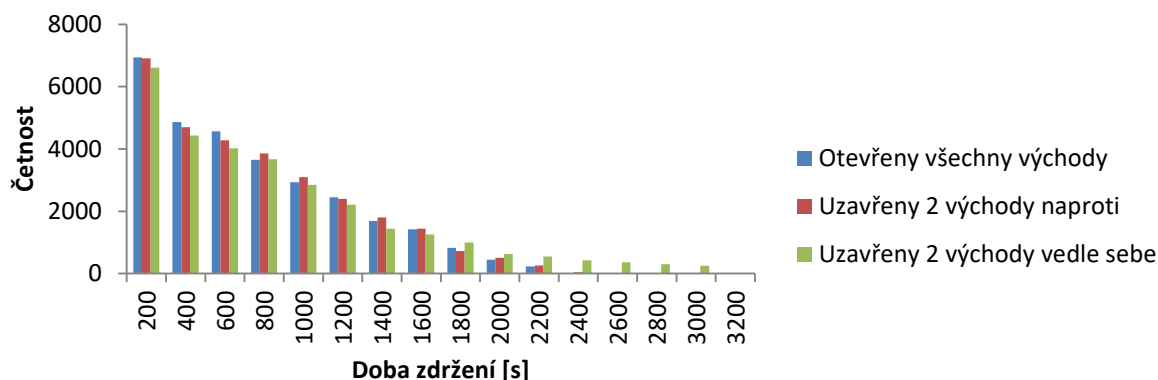
Tabulka 5.10 Porovnání doby vyklizení

Z výsledků simulací vidíme, že při zavření východů nacházejících se naproti sobě se doba vyklizení stadionu oproti normálnímu stavu prodlouží pouze přibližně o 2 minuty, což není výrazný rozdíl. Pouze se mírně zvýší délka trasy a doba zdržení pro některé návštěvníky.

Pokud ovšem zavřeme 2 východy na stejné straně stadionu, má to již větší dopad. Oproti první variantě se doba vyklizení zvýší o 13 a půl minuty. To je způsobeno přesunem ke vzdálenějším vchodům, tvořící se fronty a z toho plynoucí delší čekací době.

V následujících grafech vidíme porovnání doby zdržení a délky trasy v jednotlivých variantách:

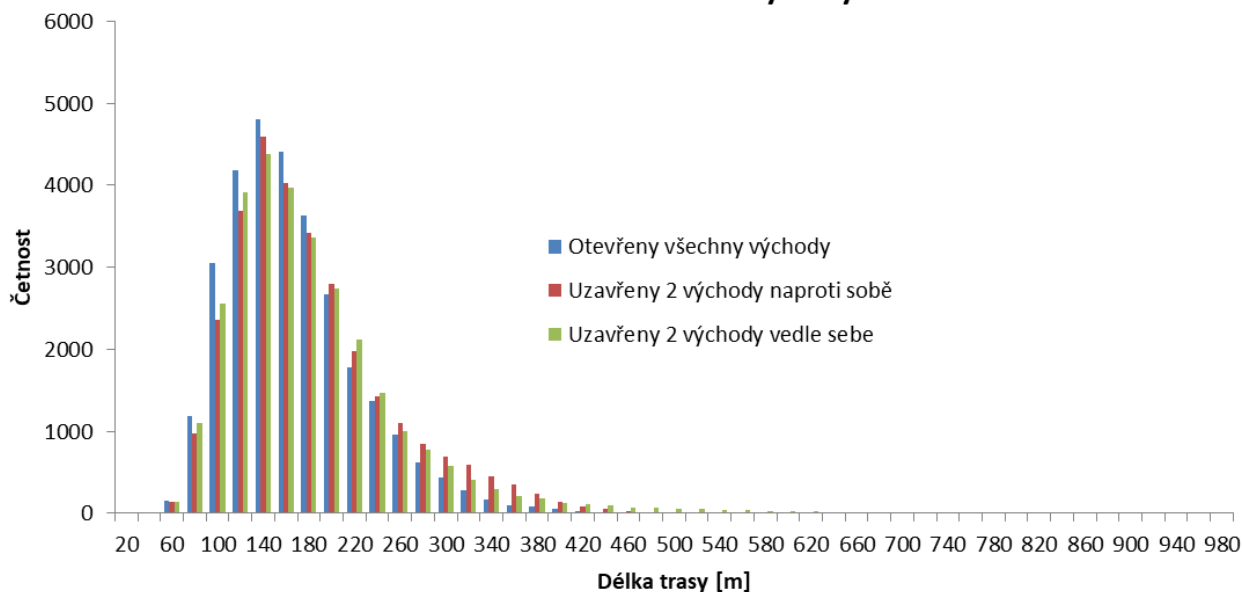
### Porovnání doby zdržení



Obrázek 5.19 Porovnání doby zdržení

Doba zdržení u varianty otevřených východů a uzavřených východů naproti se od sebe příliš neliší. Při uzavření východů na stejné straně již čekací doba narůstá. To je způsobeno pohybem většího počtu návštěvníků směrem k východům, které nejsou při ostatních variantách tolik využívány, a tím způsobenou tvorbou front.

### Porovnání délky trasy

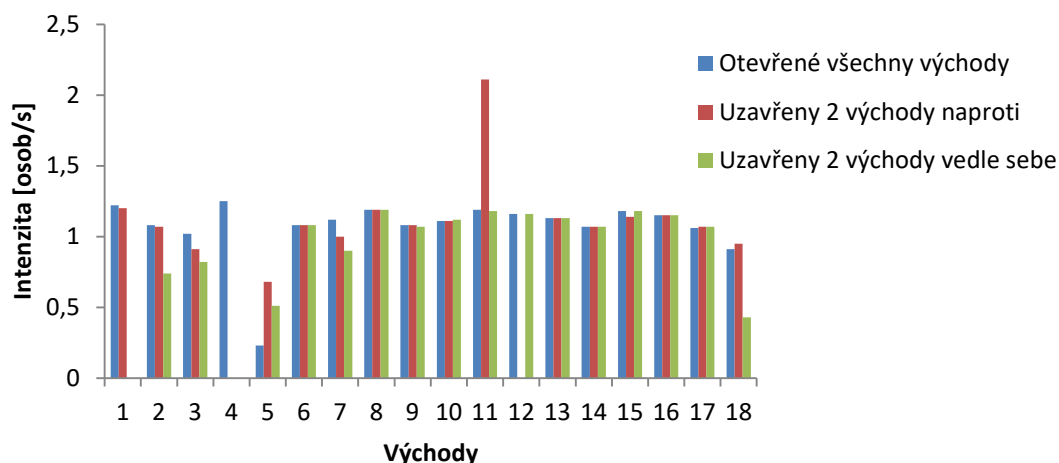


Obrázek 5.20 Porovnání délky trasy

Délka trasy je nejdelší u varianty uzavřených 2 východů vedle sebe. To je také způsobeno pohybem ke vzdálenějším otevřeným východům.

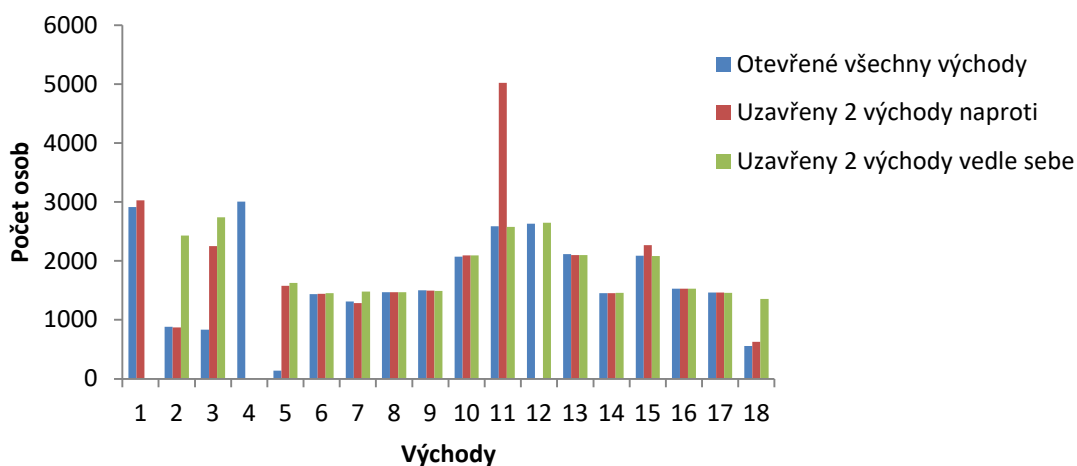
Jak můžeme vyčíst z následujících grafů, uzavření některých východů má také vliv na intenzitu pohybu a obsazenost ostatních východů.

### Intenzita v jednotlivých východech



Obrázek 5.21 Porovnání intenzity v jednotlivých východech

### Obsazenost jednotlivých východů



Obrázek 5.22 Obsazenost jednotlivých východů

Uzavření východů naproti sobě (4 a 12) ovlivní východy 3, 5 a 11. Více než dvojnásobně naroste jejich obsazenost. Intenzita mírně klesne u východů 3, naopak u východů 5 a 11 se zdvojnásobí.

Východ 5 se běžně používá pouze minimálně, naopak nyní je pro část návštěvníků nejschůdnější variantou. Návštěvníci, co běžně využívají východ 4, se tedy rozdělí mezi východy 3 a 5. Jelikož do východu 3 proudí diváci z obou pater tribuny, nedorazí do něj ve stejný moment, a proto není tolik ovlivněna intenzita. Osoby běžně odcházející východem 12 přesunou k východu 11, což zdvojnásobí jeho intenzitu z důvodu plynutí osob do východu z obou stran.

Uzavření východů na stejné straně (1 a 4) ovlivní východy 2, 3, 5 a 18. Více než dvojnásobně naroste jejich obsazenost. Intenzita mírně klesne u východů 2, 3 a 18, naopak u východu 5 se zdvojnásobí.

Návštěvníci běžně používající uzavřené východy 1 a 4 se rozdělí mezi ostatní nejbližší východy, což jsou východy 2, 3, 5 a 18. Východy 5 a 18 nejsou běžně příliš využívány, proto hodnoty intenzity nejsou vypovídající. V případě této varianty je jejich intenzita prakticky stejná.

## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo aplikovat modelování pohybu osob na interiér navrhovaného Zemského fotbalového stadionu Brno a analyzovat, zda a jak ovlivní změna vstupních parametrů dobu vyklizení stadionu a případný další vliv na výsledky simulace. Posuzovány byly 2 varianty parametrických změn. Nejprve bylo změněno věkové složení osazenstva a s tím související změna rychlosti a reakční doby. Druhou změnou bylo uzavření různých únikových východů. Pro obě z těchto možností byly analyzovány 3 varianty a porovnány mezi sebou.

Z výsledků simulací bylo zjištěno, že změna rychlosti a reakční doby má vliv jak na celkovou dobu vyklizení stadionu, tak i na délku trasy jednotlivých osob a dobu jejich zdržení ve frontách. Porovnány byly varianty starého publika, mladého publika a varianty se vstupními hodnotami dle normy ČSN pro požární bezpečnost budov. Výsledkem je, že normové hodnoty rychlosti pohybu jsou posunuty výrazně na stranu bezpečnou a v důsledku toho byla doba vyklizení u této varianty výrazně nejdelší. Mezi variantami mladého a starého publika rovněž nastal rozdíl, i když ne tak výrazný. Můžeme tedy říct, že věkové rozložení návštěvníků a s tím související změna vstupních parametrů ovlivňuje průběh vyklizení stadionu.

Co se týká variant uzavření jednotlivých východů, byly porovnávány varianty otevření všech únikových východů, uzavření 2 východů na jedné straně stadionu a 2 východů na protější straně stadionu. Podle dosažených výsledků můžeme říct, že uzavření některých východů má velký vliv na průběh vyklizení stadionu. Důležité ovšem je, které konkrétní východy jsou uzavřeny. Záleží rovněž na geometrickém uspořádání stadionu a lokalitě dalších nejbližších otevřených východů. Podle toho, které východy jsou uzavřeny, se mění doba vyklizení, doba zdržení i délka trasy jednotlivých návštěvníků.

Simulace byly prováděny v programu Pathfinder od společnosti Thunderhead Engineering. Tento program má určitá omezení, která nám nedovolují nasimulovat některé jevy, které v reálném životě provázejí evakuace. Konkrétně jde například o sociální vliv. V reálné situaci může chování člověka, snažícího se opustit stadion, ovlivnit sociální interakce s dalšími návštěvníky a v důsledku toho si zvolí jinou únikovou cestu. Druhým příkladem je tzv. afilace. Ve zkratce to znamená, že návštěvník si zvolí východ podle toho, jak je obeznámen s prostředím. Například konkrétně v případě fotbalového stadionu to znamená, že návštěvník nepříliš znalý prostředí pravděpodobně odejde východem, kterým vešel dovnitř, i když může existovat jiný východ, kterým by se dostal ven snadněji a rychleji. Ani jeden z těchto jevů není v programu Pathfinder možné reprezentovat.

Modely pohybu osob jsou tedy vhodný způsob pro simulaci dějů, které je náročné nebo nemožné prakticky vyzkoušet v reálných situacích. Nicméně je nutné počítat s tím, že model je pouze přiblížením realitě, ale nikdy skutečnosti stoprocentně neodpovídá.

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

1. **Apeltauer, T., Beneš, P. a Vrána, L.** *Aplikace pokročilých modelů pohybu osob a dynamiky požáru pro bezpečnou evakuaci osob a analýzu rizik*. Brno : (certifikovaná metodika), 2015.
2. Hajj stampede: At least 717 killed in Saudi Arabia. *bbc.com*. [Online] 2015. [Citace: 29. leden 2018.] [www.bbc.com/news/world-middle-east-34346449](http://www.bbc.com/news/world-middle-east-34346449).
3. Mecca: hajj crush kills hundreds near holy city – as it happened. *theguardian.com*. [Online] 2015. [Citace: 29. leden 2018.] <https://www.theguardian.com/world/live/2015/sep/24/hajj-crush-kills-scores-near-mecca-live-coverage>.
4. Iran says tests will show cause of diplomat's death in Saudi. [Online] 2015. [Citace: 29. leden 2018.] <http://www.afp.com/en/news/iran-says-tests-will-show-cause-diplomats-death-saudi>.
5. **Helbing, Dirk a Muker, Pratik.** Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. [Online] 2012. [Citace: 29. leden 2018.] <https://epjdatascience.springeropen.com/articles/10.1140/epjds7>.
6. Hillsborough Disaster Index. [Online] [Citace: 29. leden 2018.] <https://thegreatcritique.wordpress.com/hillsborough-disaster-index/>.
7. Hillsborough disaster: deadly mistakes and lies that lasted decades. [Online] [Citace: 29. leden 2018.] <https://www.theguardian.com/football/2016/apr/26/hillsborough-disaster-deadly-mistakes-and-lies-that-last-ed-decades>.
8. **Still, G. Keith.** *Crowd Dynamics*. Warwick : University of Warwick, 2000. PhD Thesis.
9. **N., Pelechano, a další, a další.** *Crowd Simulation Incorporating Agent Psychological Models, Roles and Communication*. Philadelphia : University of Pennsylvania, 2005.
10. **Hurley, Morgan J.** *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5. New York : Springer, 2015. 978-1493925643.
11. **Kalvach, Zdeněk.** *Základy ochrany měkkých cílů - metodika*. Praha : STPI, z.ú., 2016.
12. **Trunečka, Ondřej.** Co se dělo u stadionu? Teroristé chtěli uvnitř udeřit v přímém přenosu. *Idnes.cz*. [Online] 15. Listopad 2015. [Citace: 13. Duben 2018.] [https://fotbal.idnes.cz/teroristicke-utoky-u-stade-de-france-dva-fot\\_reprez.aspx?c=A151115\\_231716\\_fot\\_reprez\\_ot](https://fotbal.idnes.cz/teroristicke-utoky-u-stade-de-france-dva-fot_reprez.aspx?c=A151115_231716_fot_reprez_ot).
13. **Banks, Jerry, a další, a další.** *Discrete-Event System Simulation*. 5. Upper Saddle River : Pearson Education, Inc., 2010. ISBN 0136062121.
14. **Oreskes, Naomi, Shrader-Frechette, Kristin a Belitz, Kenneth.** Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*. 1994, Sv. 263, 5147.
15. **Kormanová, Anna.** A Review on Macroscopic Pedestrian Flow Modelling. [Online] 2013. [Citace: 28. březen 2018.] DOI: 10.18267/j.aip.22.
16. **Nitzsche, Christian.** *Cellular automata modeling for pedestrian dynamics*. Greifswald : Greifswald University, 2013.
17. Research Gate. [Online] 2010. [Citace: 24. březen 2018.] [https://www.researchgate.net/publication/220136467\\_Crowd\\_modeling\\_and\\_simulation\\_tech\\_nologies](https://www.researchgate.net/publication/220136467_Crowd_modeling_and_simulation_tech_nologies).

18. Crowd and Multi-agent Simulation. [Online] [Citace: 24. březen 2018.] <http://gamma.cs.unc.edu/PLE/>.
19. ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. 2009.
20. **Weidmann, Ulrich.** *Transporttechnik der Fußgänger.* Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau. 1993. Technická zpráva.
21. **Fruin, J. J.** *Pedestrian Planning and Design.* místo neznámé : Elevator World, Inc., 1971.
22. *Pathfinder 2018 User Manual.* Manhattan, KS : Thunderhead Engineering, 2018.
23. Pathfinder Features. *Thunderhead Engineering.* [Online] 2017. [Citace: 6. duben 2018.] <https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/pathfinder-features/>.
24. EXODUS - How it works. *FIRE SAFETY ENGINEERING GROUP* . [Online] [Citace: 8. duben 2018.] <https://fseg.gre.ac.uk/exodus/work.html#speci>.
25. **Hopkin, C.G., Galea, E.R. a Deere, S.J.** *A study of response behavior in a theatre during live performance.* London : Interscience Communications Ltd, 2015. ISBN 978-0-9933933-0-3.
26. **Sime, J.D.** Crowd psychology and engineering. *Safety Science.* 1995, 21.

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Přehled nejzávažnějších událostí v historii [1].....	2
Tabulka 2.2 Přehled nejzávažnějších incidentů v Evropě, USA a Japonsku od roku 1980 [1] .	3
Tabulka 2.3 Rozměry lidského těla v evropských zemích [1] .....	9
Tabulka 2.4 Level of Service .....	12
Tabulka 4.1 Rychlost pohybu a kapacita dle ČSN 73 0802 [19] .....	23
Tabulka 4.2 Hardwarové a systémové požadavky pro Pathfinder 2018 [22] .....	27
Tabulka 4.3 Srovnání výkonu nástroje Pathfinder pro různé typy modelu [1] .....	28
Tabulka 4.4 Hardwarové a systémové požadavky pro VISWALK [1].....	29
Tabulka 4.5 Hardwarové požadavky nástroje EXODUS pro různé varianty modelu [1].....	32
Tabulka 4.6 Benchmark nástroje EXODUS pro evakuaci 30 000 osob z místnosti o ploše 60 000 m <sup>2</sup> [1].....	32
Tabulka 4.7 Benchmark nástroje EXODUS pro evakuaci 8120 osob z výškové budovy o 50 patrech a podlahové ploše 90 000 m <sup>2</sup> [1] .....	32
Tabulka 5.1 Varianta 1 – rychlost pohybu .....	37
Tabulka 5.2 Varianta 1 - reakční doba .....	38
Tabulka 5.3 Varianta 2 - rychlost pohybu .....	39
Tabulka 5.4 Varianta 2 - reakční doba .....	39
Tabulka 5.5 Varianta 3 - rychlost pohybu .....	41
Tabulka 5.6 Varianta 3 - reakční doba .....	41
Tabulka 5.7 Porovnání doby vyklizení .....	43
Tabulka 5.8 Analýza uzavření východů - rychlost pohybu.....	45
Tabulka 5.9 Analýza uzavření východů - reakční doba .....	45
Tabulka 5.10 Porovnání doby vyklizení .....	49

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Vývoj počtu tragických davových událostí a jejich obětí [1] .....	2
Obrázek 2.2 Schéma pohybu proudů poutníků a místo tragédie [1] .....	3
Obrázek 2.3 Plán areálu s označením místa tragédie [5] .....	4
Obrázek 2.4 Schéma pohybu lidí při tragédii v Hillsborough [6] .....	5
Obrázek 2.5 Postupující davový kolaps [1] .....	6
Obrázek 2.6 Vliv počtu vůdců na evakuaci [9] .....	7
Obrázek 2.7 Schematické zobrazení elipsy těla ve čtverci 1x1 m [1] .....	8
Obrázek 2.8 Statická hustota osob od 1 do 5 osob/m <sup>2</sup> v půdorysném pohledu [1] .....	9
Obrázek 2.9 Srovnání půdorysného a šikmého pohledu na dav lidí o různých hustotách [1] .	10
Obrázek 2.10 Srovnání statické a dynamické hustoty v půdorysném pohledu [1] .....	10
Obrázek 2.11 Vzájemný vztah mezi rychlostí a hustotou osob [1] .....	11
Obrázek 2.12 Vzájemný vztah mezi intenzitou a hustotou osob [1] .....	11
Obrázek 2.13 Srovnání úrovně kvality pěší dopravy pro různé plochy [1] .....	12
Obrázek 2.14 Level of Service [8] .....	12
Obrázek 2.15 Plán sítě chodeb u odchodu ze stadionu s kapacitami jednotlivých úseků .....	14
Obrázek 3.1 Pohled na hrací plochu, kam byla evakuována část fanoušků [12] .....	16
Obrázek 4.1 Makroskopický model pohybu osob [1] .....	19
Obrázek 4.2 Rozdělení chodců do různých tvarů mřížek [16] .....	19
Obrázek 4.3 Zobrazení zdí v různých tvarech mřížek [16] .....	20
Obrázek 4.4 Schéma fungování celulárních automatů [17] .....	20
Obrázek 4.5 Model evakuace z místnosti s barevně rozlišenou lokální hustotou [1] .....	20
Obrázek 4.6 Model využívající agentní technologie [18] .....	21
Obrázek 4.7 Frekvence výskytu osob různých výšek [8] .....	22
Obrázek 4.8 Věkové rozložení standardní populace [1] .....	23
Obrázek 4.9 Rychlost pohybu po rovině v závislosti na věku, porovnání s ČSN [1] .....	24
Obrázek 4.10 Porovnání rychlosti pohybu po rovině s ČSN podle pohlaví [1] .....	24
Obrázek 4.11 Rychlost pohybu po schodech dle Fruina v porovnání s ČSN [1] .....	25
Obrázek 4.12 Příklad navigační sítě [1] .....	26
Obrázek 4.13 Srovnání chování osob v režimu SPFE a režimu Steering [1] .....	27
Obrázek 4.14 Porovnání modelu divadla s importovanou grafikou ve formátu DXF a vizualizaci shromaždiště osob v pokročilém 3D zobrazení [1] .....	28
Obrázek 4.15 Statistický výstup zachycující rychlost pohybu osob skrz jednotlivé východy [23] .....	28
Obrázek 4.16 Modely v programu VISWALK - vlevo schodiště, vpravo vagón metra [1] ....	30

Obrázek 4.17 Schéma jednotlivých submodelů a jejich vzájemných vztahů [1].....	30
Obrázek 4.18 Příklad propojení jednotlivých uzlů [1].....	31
Obrázek 4.19 Potenciálová mapa [1] .....	31
Obrázek 4.20 Nastavení vlastností jednotlivců a celých skupin osob [1].....	33
Obrázek 4.21 Definice rizika v modelu [1].....	33
Obrázek 4.22 Výsledky simulace ve formě grafu a 3D vizualizace [1].....	33
Obrázek 5.1 Územní studie areálu Ponava.....	35
Obrázek 5.2 Zonální členění fotbalového stadionu a jeho okolí.....	36
Obrázek 5.3 Zóny na Zemském fotbalovém stadionu.....	37
Obrázek 5.4 Varianta 1 - histogram doby zdržení .....	38
Obrázek 5.5 Varianta 1 - histogram délky trasy.....	39
Obrázek 5.6 Varianta 2 - histogram doby zdržení .....	40
Obrázek 5.7 Varianta 2 - histogram délky trasy.....	40
Obrázek 5.8 Varianta 3 - histogram doby zdržení .....	42
Obrázek 5.9 Varianta 3 - histogram délky trasy.....	42
Obrázek 5.10 Porovnání doby zdržení .....	43
Obrázek 5.11 Porovnání délky trasy .....	44
Obrázek 5.12 Schéma únikových východů .....	45
Obrázek 5.13 Varianta 1 - schéma únikových východů.....	46
Obrázek 5.14 Varianta 1 - histogram doby zdržení .....	47
Obrázek 5.15 Varianta 1 - histogram délky trasy.....	47
Obrázek 5.16 Varianta 2 - schéma únikových východů.....	48
Obrázek 5.17 Varianta 2 - histogram doby zdržení .....	48
Obrázek 5.18 Varianta 2 - histogram délky trasy.....	49
Obrázek 5.19 Porovnání doby zdržení .....	50
Obrázek 5.20 Porovnání délky trasy .....	50
Obrázek 5.21 Porovnání intenzity v jednotlivých východech.....	51
Obrázek 5.22 Obsazenost jednotlivých východů .....	51

## SEZNAM PŘÍLOH

Přiložené DVD obsahuje videa ze simulací:

- Video 1 – celkový pohled na stadion při otevření všech východů
- Video 2 – pohled na tvorbu front při uzavření 2 východů na opačných stranách
- Video 3 – pohled na zvýšenou intenzitu ve východu číslo 11
- Video 4 – pohled na tvorbu front při uzavření 2 východů na stejné straně