

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

**Využití agentových simulací pro minimalizaci ztrát
při teroristickém útoku**
Bakalářská práce

Autor: Mgr. Pavel Kujal
Studijní obor: Aplikovaná informatika

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Doležal

Hradec Králové

duben 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 29.4.2019

Pavel Kujal

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Doležalovi za metodické vedení práce, cenné rady a názory při jejím vypracovávání.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá využitím agentových simulací pro minimalizaci ztrát při bombovém teroristickém útoku. Je uvažováno několik z běžného života abstrahovaných scénářů a je posuzován vliv s tím souvisejícího vzájemného krytí osob na ztráty na životech.

Simulace je implementována v simulačním software AnyLogic. Jsou použita data z více běhů simulačního modelu a různými hodnotami parametrů pro hmotnost nálože a počtu okolostojících lidí.

Annotation

The focus of this bachelor's thesis is the use of agent-based simulations of terrorist bomb attacks created with primary goal to minimize losses in these horrible events. Multiple generalized everyday pedestrian scenarios/layouts are considered and effect of corresponding blockage of explosion bystanders on total casualties is examined.

The simulation is implemented in AnyLogic simulation software. The data from multiple runs with different charge weights and bystander quantities are used.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Východiska modelování komplexních systémů	3
3.1	Komplexní systémy a emergence.....	3
3.2	Model a simulace	3
3.3	Význam abstrakce při modelování	4
3.4	Metoda Monte Carlo	4
4	Některé přístupy k modelování systémů	5
4.1	Popis systémové dynamiky	5
4.2	Modelování diskrétních událostí.....	5
4.3	Agentové modely	6
5	Nástroje pro agentové modelování	7
5.1	Swarm	7
5.2	NetLogo	7
5.3	AnyLogic	8
6	Základní fyzikální aspekty exploze při bombovém útoku.....	10
6.1	Výpočet parametrů tlakové vlny	11
7	Účinky chemické exploze na lidský organismus	12
7.1	Primární zranění.....	12
7.2	Sekundární zranění	12
7.3	Terciální zranění.....	13
7.4	Kvarterní zranění	13
7.5	Model úmrtnosti po zásahu hemisférickou tlakovou vlnou	14
8	Předchozí výzkum simulací bombového útoku.....	16
8.1	Usmani a kol.	16

9	Vlastní simulace bombového útoku	17
9.1	Nálož a tlaková vlna.....	17
9.2	Osoby.....	17
9.2.1	Náhodné rozložení	18
9.2.2	Shluky.....	20
9.2.3	Řady	21
9.2.4	Fronta.....	22
9.2.5	Ulice	23
9.3	Simulace krytí	24
9.3.1	2D model	24
9.3.2	3D model	25
10	Shrnutí výsledků simulací	27
11	Závěry a doporučení.....	29
12	Seznam použité literatury	31
13	Přílohy.....	33

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Idealizovaná vzdušná rázová vlna	10
Obrázek 2 - Náhodné rozložení 2D	19
Obrázek 3 - Náhodné rozložení 3D	19
Obrázek 4 - Shluky 2D	20
Obrázek 5 - Shluky 3D	20
Obrázek 6 - Řady 2D	21
Obrázek 7 - Řady 3D	21
Obrázek 8 - Fronta 2D	22
Obrázek 9 - Fronta 3D	22
Obrázek 10 - Ulice 2D	23
Obrázek 11 - Ulice 3D	23
Obrázek 12 - 2D model krytí	25
Obrázek 13 - 3D model krytí	26

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Souhrnné výsledky	27
-------------------------------------	----

1 Úvod

V dnešní době se téma terorizmu dostává stále více do veřejného prostoru. Plní stránky novin a obsah televizních zpráv, stává se tématem pro politicky angažované osobnosti. Vyvolává při tom mnohdy velmi emotivní reakce.

I když bezprostřední materiální škody a ztráty na životech způsobené teroristickými útoky nejsou ani v nejexponovanějších oblastech západního světa větší než u jiných zdrojů nebezpečí pro obyvatelstvo (jako jsou živelné pohromy, dopravní nehody či kriminální činnost), terorismus s sebou nese specifickou psychologickou kvalitu. Strach ze skrytě operující nepřátelské skupiny lidí, jež vyčkává a je připravena ze zálohy zaútočit s fanatickým odhodláním a šokovat jak volbou cíle, tak brutalitou provedení. Tento strach má bezesporu podstatný vliv na rozhodování a jednání veřejnosti. Už jen z tohoto důvodu je velmi vhodné se teroristickými útoky zaobírat. Krom toho je vhodné v rámci zodpovědného a přiměřeně obezřetného přístupu předpokládat, že riziko teroristických útoků je i v našem státě vyšší než zanedbatelné a že není vůbec jisté, jestli další útoky nebudou podstatně sofistikovanější a ničivější.

Z výše uvedeného je nasnadě, že je vhodné zaobírat se tímto tématem z hlediska různých vědních oborů, přírodovědných i společenských. Informační technologie mají v tomto multioborovém přístupu nezastupitelné místo. Jako obzvláště vhodnou metodou pro simulace vlastních útoků, jejich následků i efektivity případných protipatření se jeví agentové modelování. Umožňuje relativně jednoduše a zároveň flexibilně modelovat různé scénáře útoku. Z povahy věci je taková simulace čistě softwarová záležitost nevyžadující žádné materiální zdroje, pouze případné digitální snímání místa útoku či dalších objektů. Další nespornou výhodou je minimalizace případných etických dopadů výzkumu. Zásadní otázkou je jistě ovšem volba konkrétního designu simulačního modelu a jeho parametrů.

2 Cíl práce

Cílem této práce v akademickém smyslu je popsat jednoduchou, nicméně alespoň částečně validní simulaci útoku chemickou výbušninou odpálenou sebevražedným útočníkem. Konkrétněji je řešen vliv rozestavění a s tím související vzájemné krytí osob v okolí výbuchu. Cílem v obecnějším smyslu je drobným dílem přispět k prevenci obětí při tragických událostech tohoto druhu. Jejich zkoumání se dle rešerše pro tuto práci jeví jako mírně opomíjená oblast jinak pokročilého výzkumu MAS v naší zemi.

3 Východiska modelování komplexních systémů

Než přistoupíme blíže k otázce modelování systémů, je vhodné vymezit několik důležitých konceptů.

3.1 Komplexní systémy a emergence

Dle Kubíka (2004) komplexní systémy se vyznačují především:

- autonomií prvků
- decentralizací řízení v systému
- robustností
- adaptabilitou na změny v prostředí

Pojem emergence odkazuje na fakt, že chování systému není přímo odvoditelné z chování jeho komponent. Žádná jejich jednotlivá komponenta neřídí přímo chování systému jako celku. Komplexní chování se specifickými kvalitami se objevuje (emerguje) až díky mnohočetným a rozmanitým interakcím mezi více komponentami (Siegfried, 2014).

3.2 Model a simulace

Model je reprezentace systému vytvořená za účelem jeho studování. Ve většině případů je třeba vzít v potaz pouze ty aspekty systému, které mají vliv na konkrétní zkoumaný problém (Banks a kol., 2005).

Simulaci lze definovat mj. jako vykonávání simulačního modelu, povětšinou za využití nějakého simulačního nástroje. Simulace vezme model (a data) jako vstup a pomocí výčetních kroků jej transformuje z počátečního stavu do stavu konečného (Siegfried, 2014).

3.3 Význam abstrakce při modelování

Pro modelování je zásadní abstrakce. Tj. proces, při kterém u jevu pomíjíme charakteristiky, které pro něj nepovažujeme za určující či v daném kontextu podstatné.

Abstrakce je proces, který přirozeně používáme už od útlého dětství při poznávání světa. Díky němu v mysli konstruujeme ne kopii, ale zjednodušený model reality. Ovšem právě v toto zjednodušení tkví nevyhnutelná větší či menší nepřesnost takto vytvořených modelů. Přesnost modelů můžeme posuzovat různými způsoby, ale základní je schopnost modelu předpovídat stav systému, který popisuje.

3.4 Metoda Monte Carlo

Jedná se o numerickou výpočetní metodu, která je založena na využití náhodných veličin a teorie pravděpodobnosti. Hodnotu požadované veličiny neurčujeme přímo, ale odhadujeme ji pomocí opakovaného generování hodnot vhodně zvolených jedné či více náhodných veličin. V zásadě můžeme generovat hodnoty fyzickými úkony jako hod kostkou či tahání karet, ale obecně je nesrovnatelně rychlejší a přesnější použít strojové řešení. To může mít různé čistě softwarové podoby využívající generátory pseudonáhodných čísel, popř. může jako zdroj dat využívat fyzikálních měření. Není divu, že velkého rozmachu dosáhla metoda v 2. polovině 20. st. s nástupem počítačů.

Využití má v numerické matematice, statistice, fyzice, finančním inženýrství či informatice. Lze pomocí ní např. nahradit složité kombinatorické výpočty, výpočty určitých vícerozměrných integrálů či trajektorií částic (Kupčík, 2009).

4 Některé přístupy k modelování systémů

Pokud budeme postupovat z hlediska abstrakce od nejvíce abstraktního po nejméně abstraktní přístup, můžeme mj. rozlišit:

- popis systémové dynamiky
- agentové modely
- modelování diskrétních událostí

4.1 Popis systémové dynamiky

Popis systémové dynamiky je přístup vytvořený v polovině 50. let 20. st. profesorem MIT Jayem Forresterem. Forresterovým nápadem bylo využívat zákony fyziky, zejména zákony elektrických obvodů, k popisu a analýze dynamiky ekonomických a následně sociálních systémů. Zásady a modelovací jazyk dynamiky systému vznikly v 50. a 60. letech minulého století a dodnes zůstávají nezměněny (Borščev, 2013). Systém je nahlížen jako kauzálně uzavřená struktura, která sama o sobě určuje svoje chování. Hlavním cílem je nalézt smyčky zpětných vazeb (cirkulární kauzality) uvnitř systému. S nimi úzce souvisí zkoumání akumulace jednotek jednotlivých proměnných, jež představuje paměť systému a je hlavním zdrojem jeho nerovnováhy.

4.2 Modelování diskrétních událostí

Pokud dočasně pomineme agentové modely, jimž se budeme v dalším textu věnovat nejpodrobněji, ocitáme se v opačné části spektra, co se týče abstrakce. Jí odpovídá přístup založený na modelování diskrétních událostí.

Ten je stejně téměř stejně starý jako popis systémové dynamiky a je spojen s osobou inženýra firmy IBM Geoffrey Gordona, který v r 1961 představil první verzi GPSS (General Purpose Simulation System). Základní myšlenkou je v tomto případě

modelování systému jako procesu, přesněji jako sekvence operací na jednotlivých entitách systému (Borščev, 2013).

Operace zahrnují zdržení, obsluhu různými zdroji, výběr větve procesu, rozdělení, spojování a další. Pokud entity soutěží o zdroje a mohou být zpožděny, jsou prakticky ve všech modelech diskrétních událostí přítomny fronty. Model je graficky vyjádřen jako vývojový diagram procesů, ve kterých bloky představují operace.

4.3 Agentové modely

Přístup založený na použití agentů je o poznání novější než předchozí dva zmíněné. Teprve v prvních letech první dekády 21. st. se z akademické oblasti přesunul do praxe. Přispěl k tomu mj. i technický pokrok, který znamenal vyšší dostupnou výpočetní sílu dostupnou pro simulace.

U agentového přístupu nemusíme znát, jak se chová systém jako celek. Stačí, pokud máme nějaký vhled do toho, jak se chovají jednotlivé objekty v něm. Systém modelujeme „odspodu“ tak, že definujeme tzv. agenty – jejich vlastnosti a chování (vč. případného „povědomí“ o ostatních agentech). Následně agenty spolu necháme spolu interagovat. Globální chování systému jako celku je pak emergentní kvalitou vzniklou kombinací chování jednotlivých agentů.

Agentový přístup nepředpokládá nějakou určitou úroveň abstrakce (Borščev, 2013). Agenty mohou reprezentovat např. jednotlivé fyzické objekty, osoby či instituce a stejně tak jejich soubory či agregace – v případě jednotlivce např. nukleární rodina žijící ve společné domácnosti.

Agentové modely jsou ze své podstaty asynchronní (Borščev, 2013). Změny v něm nejsou primárně vázány na změny v čase ale na posílání zpráv mezi agenty. To ovšem neznamená, že určité synchronní aspekty nemohou být do modelu zapracovány.

5 Nástroje pro agentové modelování

Agentové modely mohou být modelovány pomocí UML (Unified Modeling Language), resp. jeho specifikace AML (Agent Modeling Language). Bývají z valné části implementovány pomocí objektových programovacích jazyků. Pro náš výzkum je použit simulační nástroj AnyLogic, který využívá programovací jazyk Java (a základem mu je IDE Eclipse). Ovšem, než přistoupíme k podrobnějšímu popisu tohoto nástroje, je na místě alespoň krátce zmínit nástroje alternativní, které nebyly shledány natolik vhodné pro náš výzkumný problém, ale dále ilustrují možnosti zástupců této kategorie.

5.1 *Swarm*

Jedná se o jednu z nejznámějších multiagentových platforem (soubor knihoven) pro vývoj umělých světů na bázi distribuované umělé inteligence. Swarm má dlouhou tradici a stal se inspirací i pro jiná vývojová prostředí, např. RePast a a Ascape (Husáková, 2007). Základní jednotkou simulace je tzv. Swarm (roj). Jedná se o seskupení agentů, kteří provádějí určitou činnost. Taková jednotka je schopná si stavět svůj vlastní svět. Swarm je vlastně objekt, který disponuje určitou pamětí a plánovačem událostí. Objekty Swarmu jsou hierarchicky organizovány do podoby podtříd (dílčích skupin, rojů). Každý Swarm je zodpovědný za řízení své paměti a zpracovávání zdrojů, které jeho objekty požadují pro svou činnost (Husáková, 2007).

5.2 *NetLogo*

NetLogo je programovatelné prostředí pro modelování přírodních a společenských jevů. Vytvořil ho Uri Wilensky v roce 1999 a nadále se vyvíjí v Centru e-learningu a počítačového modelování (Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling) na Northwestern University v Chicagu v USA (NetLogo 4.0.4 Uživatelská příručka, 2010).

NetLogo je vhodné zejména pro modelování komplexních systémů, které se vyvíjejí průběžně v čase. Uživatelé mohou zadat příkazy stovkám či tisícům „agentů“ pracujícím nezávisle na sobě. To umožňuje zkoumat spojení mezi chováním jedinců na mikro úrovni a strukturou na makro úrovni, jež je vytvořena na základě interakce mezi mnoha jednotlivci.

Slovo „Logo“ je v názvu, jelikož NetLogo je dialekt jazyka Logo. Slovo „Net“ odkazuje na decentralizované a zároveň vzájemně propojené jevy, které je možno modelovat pomocí NetLogo. Rovněž odkazuje na nástroj HubNet. NetLogo lze připojit k výukovému simulačnímu nástroji HubNet. Pomocí počítače připojeného k síti nebo mobilního zařízení, jako jsou např. grafické kalkulačky Texas Instruments, může každý uživatel řídit agenta v simulaci.

5.3 AnyLogic

AnyLogic je simulační nástroj, který, byť je tu uváděn primárně jako zástupce agentového přístupu, inkorporuje též popis systémové dynamiky a modelování diskrétních událostí. Jak už bylo zmíněno, umožňuje vytváření algoritmů v jazyce Java a je modifikací IDE Eclipse. Obsahuje mj. knihovny zaměřené na modelování:

- procesů
- provozu motorových vozidel na pozemních komunikacích
- provozu na železnici
- pohybu chodců
- pohybu materiálu a strojů v továrnách a skladech
- pohybu kapalin v těžařském a chemickém průmyslu

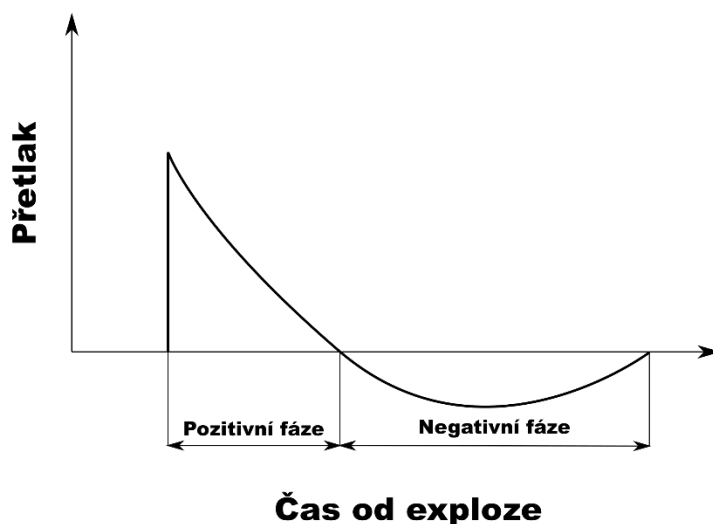
Byť nevyhovuje dokonale, zejména knihovna zaměřená na pohyb chodců je velmi významná pro náš výzkumný problém. Simulovaný pohyb osob může např. zahrnovat otevřené prostranství nebo frekventovanou chodbu či dokonce několik pater vícepatrové budovy, mezi kterými dochází k přechodu pomocí simulovaných schodišť. Osoby mohou setrvávat po určitou (dynamicky určovanou) dobu na

daném místě, aby byla simulována konzumace určité služby (např. obslužení u přepážky, vyšetření pomocí diagnostického přístroje) či prosté čekání. Je možné vizualizovat koncentraci osob pomocí teplotních map (v orig. heat maps).

6 Základní fyzikální aspekty exploze při bombovém útoku

Exploze je jev, při kterém se v relativně krátkém čase uvolňuje velké množství energie. Zdrojem energie může být obecně např. střelný prach, metan v důlním objektu, přetlak páry v bojleru či nekontrolovaná jaderná reakce. My se v naší práci budeme zabírat výhradně explozí způsobenou chemickou reakcí, která produkuje rázovou tlakovou vlnu. Pro zjednodušení bude vždy předpokládána chemická reakce trinitrotoluenu (TNT), jež i přes rozvoj novějších (např. plastických) výbušnin často používá jako referenční (Kinney a Graham, 1985).

U rázové tlakové vlny můžeme v průběhu času rozlišit dvě fáze, jež v idealizované podobě znázorňuje diagram níže. Rozlišujeme pozitivní (přetlakovou) a negativní (podtlakovou) fázi. Přičemž pozitivní fáze začíná kontaktem s čelem vlny a trvá relativně krátkou dobu. Při velké míře zjednodušení lze říci, že v negativní fázi působí mírnější síly opačným směrem oproti fázi přetlakové (Kinney a Graham, 1985). Faktem je, že v praxi dochází složitým interakcím sil, zejm. způsobených odrazy vlny od povrchů (mnohdy s různými vlastnostmi).



Obrázek 1 - Idealizovaná vzdušná rázová vlna

6.1 Výpočet parametrů tlakové vlny

Pro jakoukoliv smysluplnou simulaci je třeba kvantifikovat fyzikální parametry vlny. Pomineme-li komplexní simulace pomocí částicových fyzikálních modelů, je možno použít rovnice vycházející z fyzikální teorie. Především pro relativní snadnost použití, však byly zvoleny mnohočleny, jež jejichž koeficienty byly odhadnuty regresí empirických dat z hemisférického výbuchu 1 kg TNT. Tyto byly publikovány mj. v instruktážním manuálu NATO pro uchovávání a přepravu munice (AASTP-1, 2010) a využívá je i Kancelář OSN pro odzbrojení (UNODA).

Kvůli většímu rozsahu a zároveň malému přínosu k vhledu do fungování fyzikálních jevů jsou polynomy uvedeny v příloze (vizte přílohu 1). Pro úplnost je vhodné dodat, že pro účely vlastní simulace jsou použity údaje o času potřebném k tomu, aby čelo tlakové vlny dorazilo do daného bodu (arrival time), o maximálním přetlaku (incident overpressure), a délce trvání pozitivní fáze (positive phase duration). Odhady je možné škálovat i pro větší hmotnosti náloží.

7 Účinky chemické exploze na lidský organismus

Chemické exploze způsobují zranění, jež je možno rozdělit do čtyř kategorií: primární, sekundární, terciální a kvarterní (Tan, 2017). Tyto kategorie jsou odvozeny jak od účinků samotné tlakové vlny, tak od faktorů prostředí v nich se výbuch odehrává.

7.1 Primární zranění

Primární zranění jsou způsobena pohybem rázové tlakové vlny jako takové. Jsou specifická pro vysoce explozivní výbušniny, protože pouze ty způsobují (z definice) rázovou tlakovou vlnu (cit). Tlakové vlny působí intenzivněji v místech přechodu mezi látkami s různou hustotou, tedy především v dutých orgánech naplněných vzduchem. Primárními zraněními jsou postiženy především plíce, sluchové orgány, oči, mozek a gastrointestinální trakt (GIT) (Tan, 2017).

- **plíce** – poškození plicního parenchymu, projevy příznaků i s čas. odstupem
- **sluchové orgány** – poškození ušního bubínku a středního ucha
- **oči** – protržení oční bulvy
- **mozek** – poškození parenchymu mozku, a to i bez zjevného poranění hlavy
- **GIT** – protržení a vnitřní krvácení, postiženy mohou být i neduté orgány

7.2 Sekundární zranění

Sekundární zranění jsou způsobena objekty, jež jsou vrženy tlakovou vlnou a působí v první řadě na povrch těla. Vržené objekty mohou mít velmi různou velikost a mohou pocházet z výbušného zařízení samotného nebo z okolí výbuchu.

Výbušná zařízení používaná při teroristických útocích bývají zaměřená především na působení sekundárních zranění (Usmani a Kirk, 2011). Přidáním snadno dostupných komponent jako hřebíky, šrouby, kuličková ložiska do obalové vrstvy je

většinou možno podstatně zvýšit potencionální ranivý účinek i ve větších vzdálenostech. (Na rozdíl účinku samotné tlakové vlny, který se vzdáleností mnohem rychleji degraduje.)

Z medicínského hlediska lze očekávat při kontaktu těla s projektily různé velikosti tržná, resp. řezná zranění, zlomeniny, vykloubení končetin či dokonce jejich amputace (Tan, 2017).

7.3 Terciální zranění

Terciální zranění jsou způsobena odhozením těla oběti a následným pádem na zem či nárazem do jiného objektu. Popř. zhroucením stavby a částečným či úplným zavalením oběti. Typické jsou zlomeniny, vč. fraktur lebky a páteře, amputace končetin různé závažné pohmožděniny, vnitřní zranění (Tan, 2017).

Účinek tlakové vlny na osoby a budovy se přitom liší. Pro předpověď četnosti a závažnosti zranění se (zejm. u jednodušších modelů) více zohledňuje maximální přetlak. Pro škody na budovách pak celkový tlakový impuls vlny (FEMA 426, 2003).

7.4 Kvarterní zranění

Kvarterní zranění jsou všechna ta, jež nespádají do žádné z předešlých kategorií. Jedná je např. o účinky ohně, plynů, dýmu, toxických látek, biologických činitelů, radiace (v případě tzv. „špinavých bomb“) a v neposlední řadě i psychického šoku.

Je nutné mít na paměti, že každý teroristický útok probíhá v komplexním prostředí reálného světa, nikoliv v relativně jednoduše definovaném a kontrolovatelném laboratorním prostředí. Na četnost a závažnost zranění mají významný vliv i zdánlivě méně podstatné faktory jako věk a pohlaví oběti, její předchozí zdravotní komplikace (mj. kardiovaskulární či respirační onemocnění). I zeměpisná lokace výbuchu hraje důležitou roli. Velmi horké či chladné počasí mohou pro jinak dobře adaptovaný organizmus oslabený akutním zraněním znamenat rozdíl mezi životem a smrtí.

7.5 Model úmrtnosti po zásahu hemisférickou tlakovou vlnou

V simulaci používaný model úmrtnosti pochází původně z výzkumu I. G. Bowena *Estimate of Man's Tolerance to the Direct Effects of Air Blast* (Bowen, Fletcher a Richmond 1968). Rovnice jsou odvozeny z dat o mortalitě savců různých druhů, jež byli vystaveni tlakovým vlnám v těsné blízkosti pevné odrazné plochy.

Tolerance vůči primárním účinkům tlakové vlny se snižuje se zvyšující se hustotou plicní tkáně a zvyšuje s rostoucí normalizovanou plicní kapacitou. Index odolnosti člověka jako lidského druhu byl určen jako harmonický průměr skupiny savců s rel. vysokou resistencí vůči tlakovým vlnám (Bowen, Fletcher a Richmond, 1968).

Byť se jedná o výzkum z období studené války, jsou jeho výsledky s revizemi používány do dnešní doby. Lze předpokládat, že ani v dohledné době v zemích západního světa z etických důvodů podobné pokusy na zvířatech nebudou probíhat, popř. ne v tomto rozsahu.

Rovnice Bowenova modelu dle McMichaela (2011):

$$T = t_{dur} \left(\frac{70}{m} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{14,7}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Kde m je hmotnost zasažené osoby; t_{dur} délka trvání přetlakové fáze v milisekundách a p_{atm} atmosférický tlak v jednotkách PSI.

$$p_r \left(\frac{61,5}{P_{sw}} \right) \left(\frac{14,7}{P_{atm}} \right) = 61,5 \left(1 + 6,76 T^{-1,064} \right) e^{0,1788(5 - Z)}$$

Kde P_{sw} je index odolnosti odhadnutý Bowenem pro člověka jako lidský druh na 61,5; p_{atm} je atmosférický tlak v PSI a Z je zvolená hodnota probitu (např. 7,33 pro 99 % pravd. přežití či 2,67 pro 1 % pravděpodobnost přežití).

$$p_i = \frac{(p_r - 7p_{atm}) + \sqrt{(7p_{atm} - p_r)^2 + 98p_{atm}p_r}}{7}$$

Hodnota p_i je pak kritickou hodnotu max. přetlaku pro zvolenou hodnotu probitu. Pokud je např. maximální přetlak působící na osobu menší než p_i určené pro 1 % pravd. přežití ($Z = 2,67$), pak je pravděpodobnost přežití vyšší než 1 %.

8 Předchozí výzkum simulací bombového útoku

8.1 *Usmani a kol.*

Článek autorů Z. Usmaniho, E. Y. Imany a D. Kirka (2009) zkoumá sebevražedný bombový útok pomocí simulace založené na použití agentů. Popisuje fyzikální aspekty, modely výbuchů a další výpočty a dále předpoklady, které potřebujeme k vytvoření výše uvedené simulace. Simulace zahrnuje lidské štíty rozmístěné v davu s částečným a úplným pokrytím ostatních cílů ve dvojrozměrných a trojrozměrných prostředích.

Autoři vyvinuli virtuální simulační nástroj, který je schopen posoudit dopad jednotlivých vzorců rozmístění osob a jejich hustoty na závažnost zranění a počet obětí během sebevražedného bombového útoku. Výsledky ukázaly, že nejhorší formací davu je ta, jež zhruba odpovídá rozmístění lidí běžně na ulici (reprezentován ostře zvlněnými řadami osob), kde 30 % osob může zemřít a 45 % může být zraněno s ohledem na obvyklou výbušnou sílu sebevražedného atentátu. Umístění osob do rovných řad se naopak ukázalo jako nejlepší pro snížení účinnosti útoku s 18 % davu v letální zóně a 38 % oblastech s následkem zranění. Autoři uvádějí, že při aplikaci několika doporučení uvedených v článku je možné v případě typického sebevražedného bombového útoku snížit počet úmrtí o 12 % a počet zranění o 7 %. Výsledky simulace byly údajně porovnány a ověřeny reálnými událostmi v Iráku a shledány dostatečně shodné. Nekrytý výhled na bombového útočníka, úprk k východu a ušlapání byly vyhodnoceny jako nejsmrtelnější okolnosti během i po útoku. Tato zjištění, ač předběžná, mohou být údajně využita pro reakce na mimořádné situace a boj proti terorismu.

9 Vlastní simulace bombového útoku

Pro vytvoření simulace byl použit simulační software AnyLogic. Měnitelnými parametry simulace byl výchozí vzor rozestavění osob, počet osob a hmotnost explozivní nálože TNT. Simulace mohla běžet v režimu jednoho běhu se zobrazením virtuální scény v okně aplikace, popř. v režimu mnohonásobných běhů s variací parametrů. V obou případech byla výsledná data zapisována do souboru aplikace MS Excel.

Byly definovány dva typy agentů: první pro osoby zasažené tlakovou vlnou, druhý pro nálož, resp. tlakovou vlnu.

9.1 Nálož a tlaková vlna

Nálož byla v simulaci vždy pouze jedna na předem určené pozici (z hlediska os X a Y), vždy v nulové výšce. Účinná hmotnost byla dána parametrem. Volen byl rozsah hodnot, jež by zhruba odpovídal náložím v sebevražedných vestách až „kufříkovým“ bombám, nebylo cílem zahrnout např. nálože osobních automobilech či dodávkách.

Nálož byla pro přehlednost reprezentována v 2D vizualizaci červeným kruhem, v 3D vizualizaci pak červenou koulí. Tlaková vlna by reprezentována dvourozměrně jako zvětšující se lehce průhledný červený kruh a trojrozměrně jako relativně nízký průhledný válec.

Výpočty parametrů tlakové vlny se aktualizovaly v pravidelném intervalu desetiny milisekundy. Aktualizace by nastaveny do chvíle, kdy vlna minula nejvzdálenější osobu, popř. po uplynutí 100 milisekund. K tomu v simulacích dle očekávání nedocházelo. Po ukončení aktualizací parametrů vlny byl vždy ukončen daný běh.

9.2 Osoby

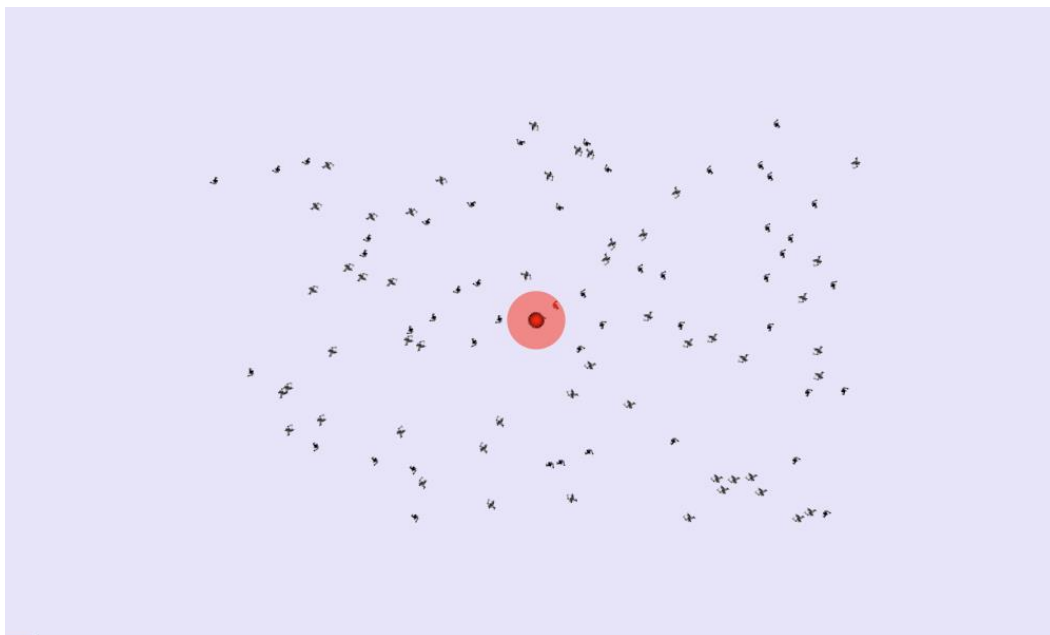
Počet osob byl dán parametrem simulace. Pohlaví bylo určováno náhodně. S ohledem na pohlaví byly generovány hodnoty krycí šířky (trup a připažené horní končetiny). Použita byla data z antropologických měření vojaček a vojáků americké

armády (Gordon a kol., 1988), přičemž bylo předpokládáno normální rozložení rysu. Ženy a muži byli ve vizualizaci rozlišení použitím odlišného modelu. Generované konkrétní proporce jedinců proporce modelů vizualizaci nijak neovlivňovaly, byly ale zohledněny při výpočtech vzájemného krytí. Pro zjednodušení se vždy předpokládalo natočení všech osob směrem k výbuchu. V případě simulovaného úmrtí jednotlivce, dostalo celkové zbarvení jedince zřetelně červený nádech.

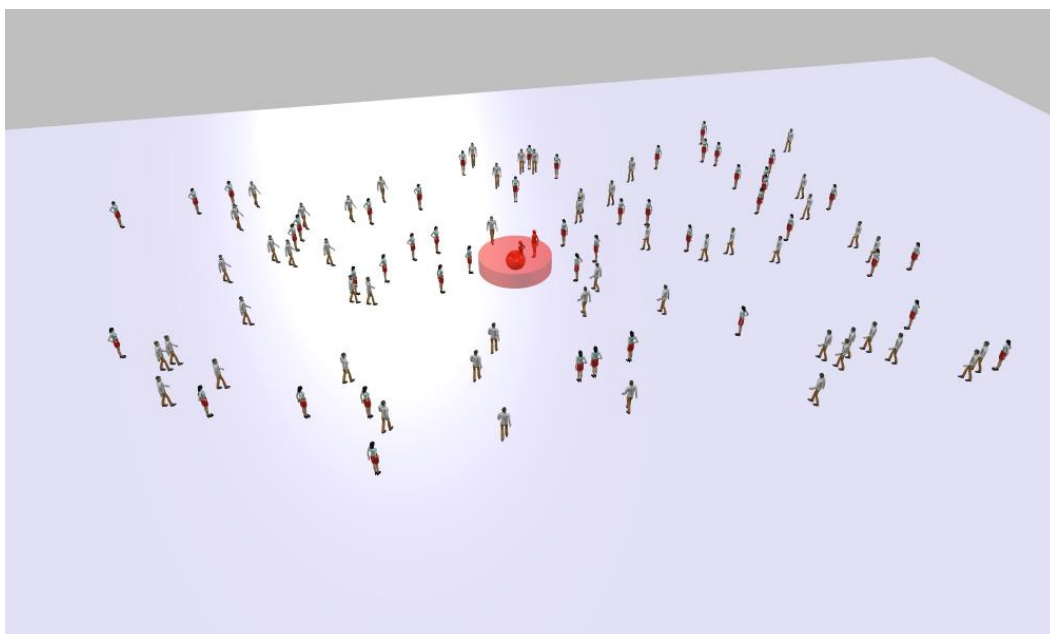
Bylo zvoleno pět základních vzoru rozestavení osob vycházejících (s jednou výjimkou) ze situací běžného života. Konkrétně jde o uniformně náhodné rozložení, shluky, řady, frontu a abstrahované rozložení lidí pohybujících se po chodníku či pěší zóně. Žádné z předpisů pro rozmístění nebyly úplně deterministické, ani ty, které využívali vodících čar, viditelných na obrázcích níže. Pro všechna nastavení parametrů tedy mělo smysl více opakování/replikací.

9.2.1 Náhodné rozložení

Toto rozložení nebylo jako jediné koncipováno jako cílená nápodoba situace (či skupiny situací) reálného světa. Pouze při velmi vysoké hustě by mohlo připomínat jednolitý dav. Souřadnice pro osy X a Y byly pomocí dvou náhodných veličin s uniformním rozdělením. Nutno podotknout, že intervaly X a Y souřadnic byly zvoleny menší než souřadnice krajních bodů povrchu, na který byl každý agent umisťován (na obrázku světle fialovou barvou).



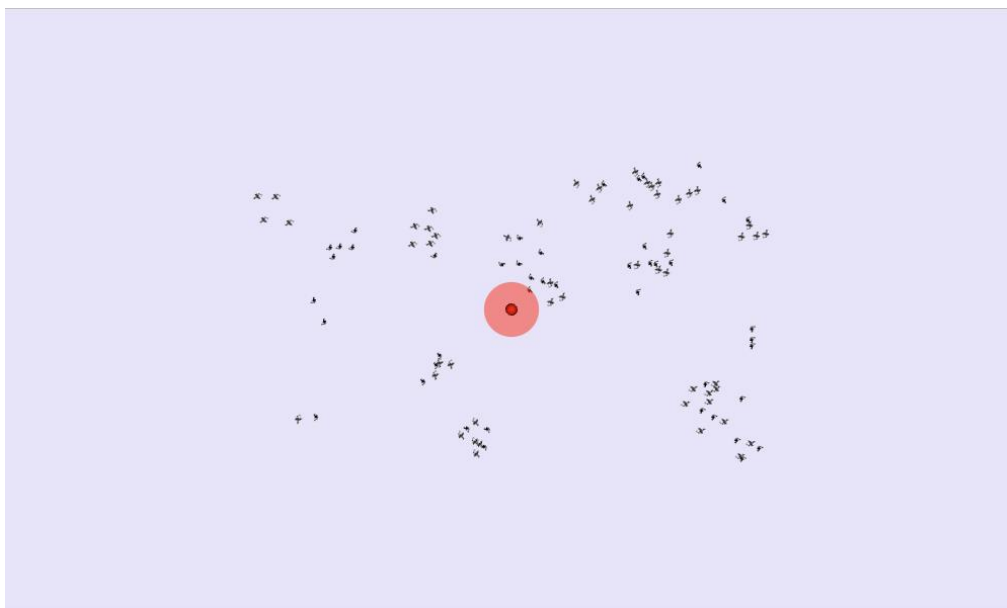
Obrázek 2 - Náhodné rozložení 2D



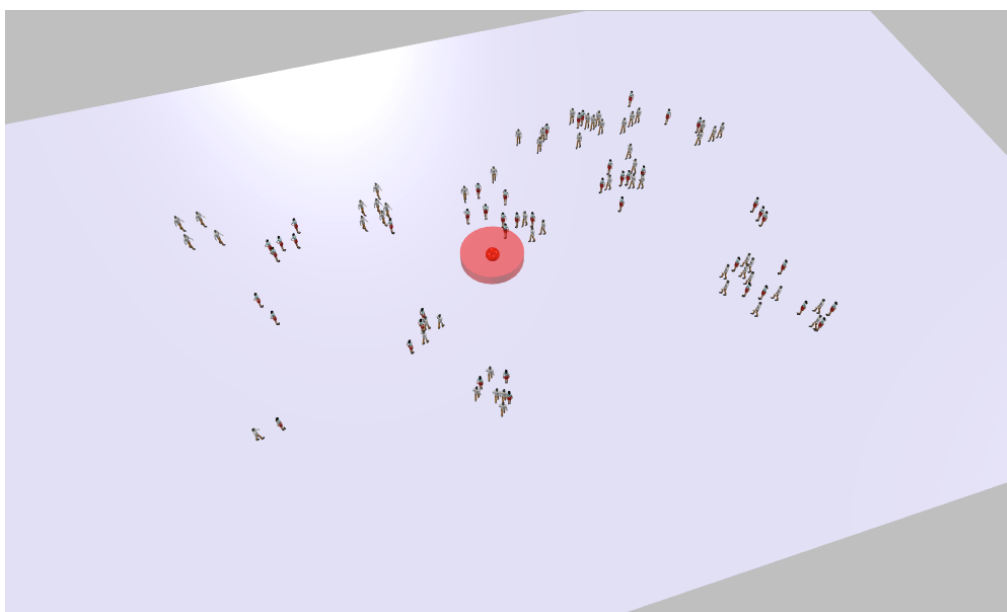
Obrázek 3 - Náhodné rozložení 3D

9.2.2 Shluky

Shluky byly koncipovány jako relativně jasně oddělené skupinky či hloučky více či méně mezi sebou známých lidí, jež přirozeně vznikají např. při čekání nějakou společenskou událost. Opět platí, že intervaly souřadnic pro osy X a Y byly zvoleny menší než souřadnice krajních bodů povrchu.



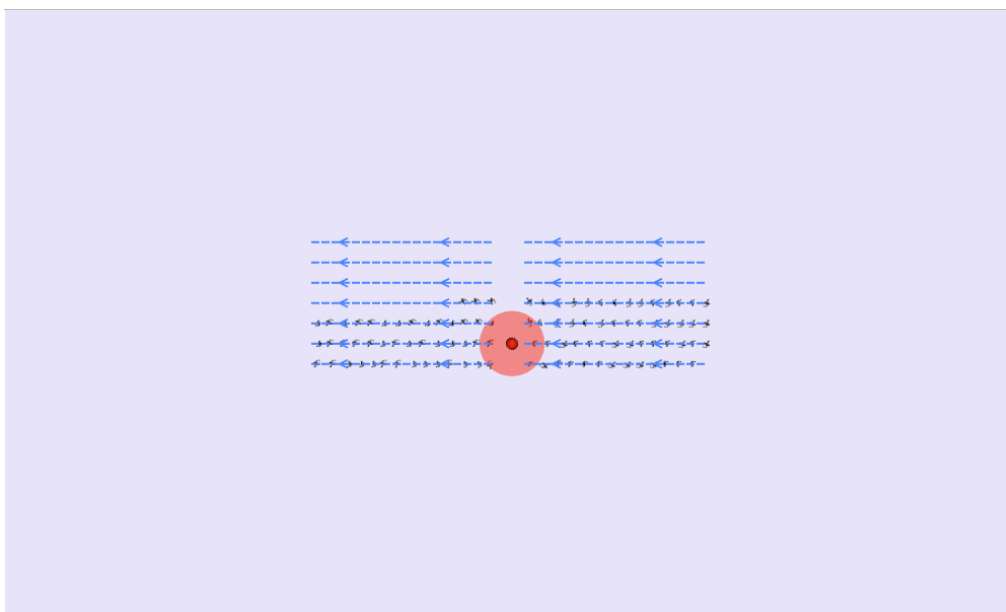
Obrázek 4 - Shluky 2D



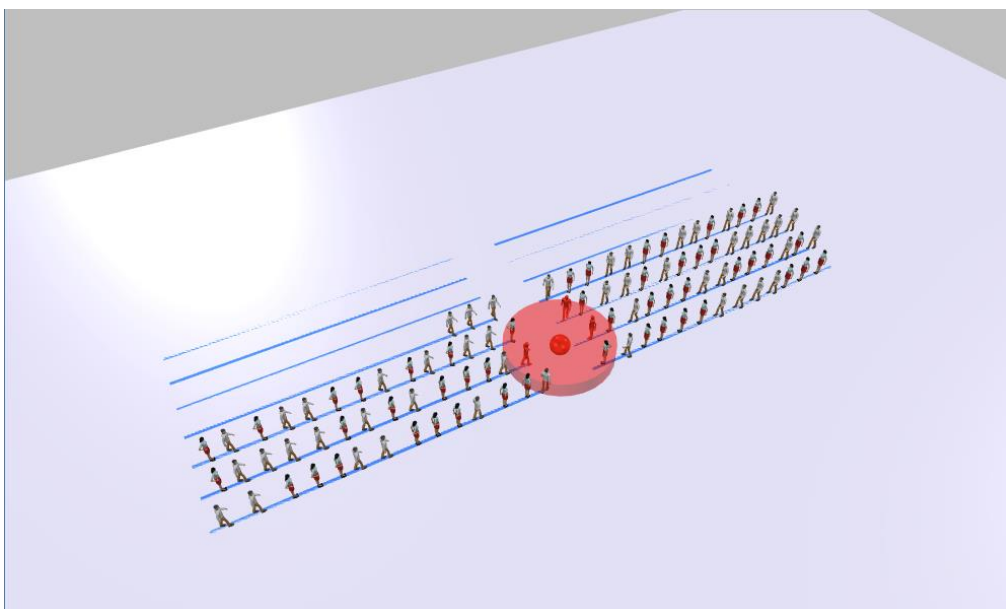
Obrázek 5 - Shluky 3D

9.2.3 Řady

Toto rozložení bylo zamýšleno jako nápodoba skupiny lidí, kteří vcelku organizovaně stojí na veřejné akci, např. v kostele, mešitě, na vojenské přehlídce.



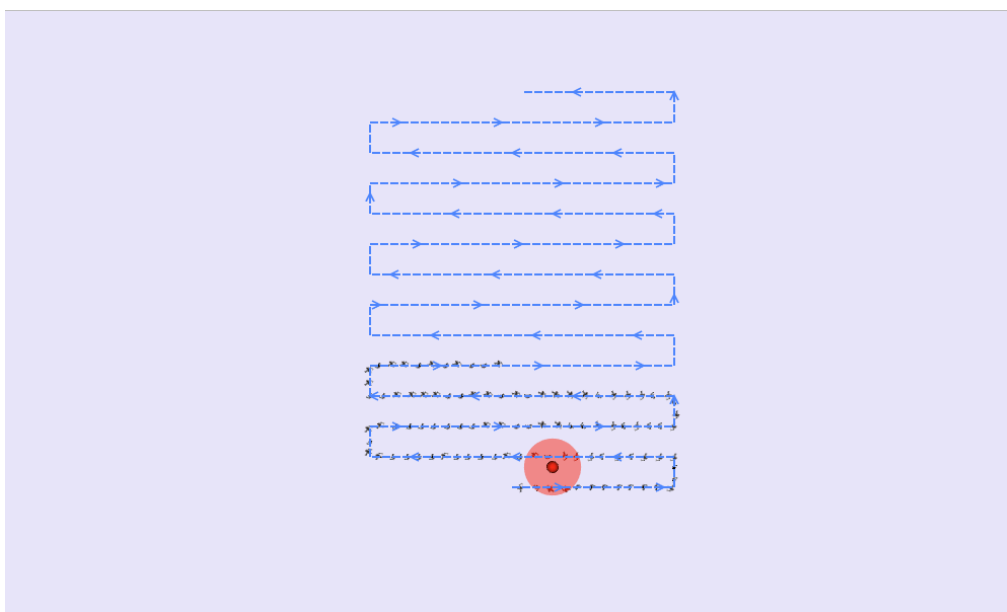
Obrázek 6 - Řady 2D



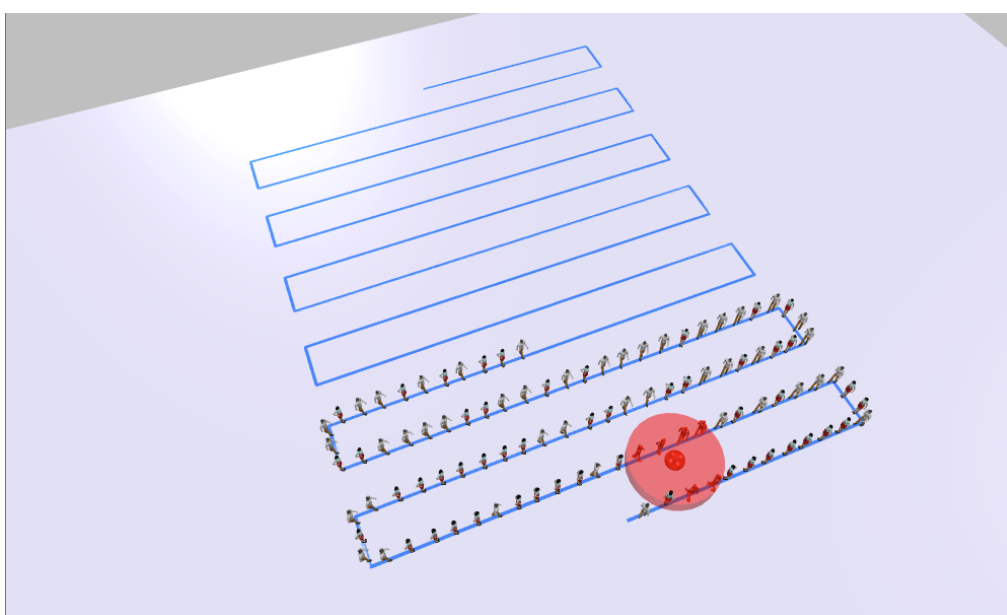
Obrázek 7 - Řady 3D

9.2.4 Fronta

Toto rozložení má reprezentovat řazení osob do fronty. Lze jistě oprávněně namítat, že skutečné fronty bývají komplexněji uspořádané, ale bylo nutno přistoupit k určité generalizaci/abstrakci. Směr šipek neodpovídá hypotetickému pohybu osob.



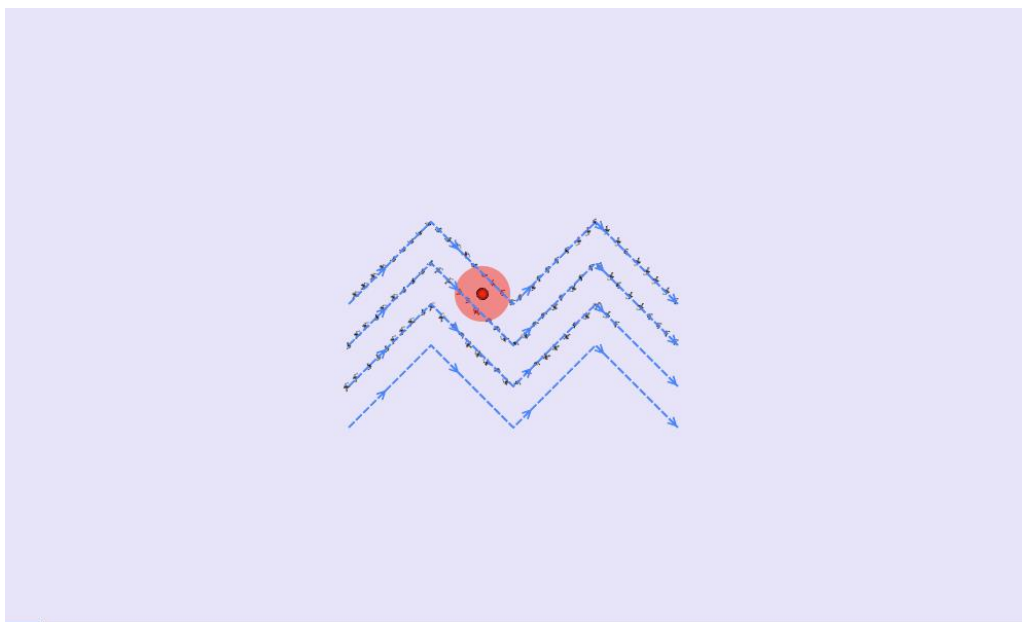
Obrázek 8 - Fronta 2D



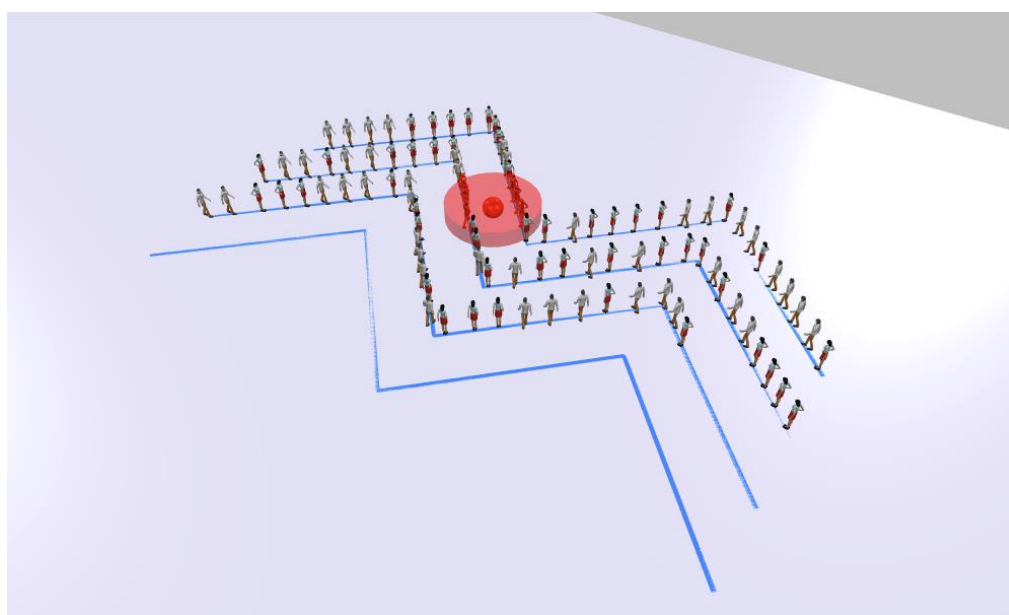
Obrázek 9 - Fronta 3D

9.2.5 Ulice

Volba tohoto rozložení k reprezentaci chodců pohybujících se volně po ulici se může jevit asi jako nevíce sporná. Významnou inspirací bylo jedno z rozložení z výzkumu Usmaniho (Usmani, Imana a Kirk, 2009).



Obrázek 10 - Ulice 2D



Obrázek 11 - Ulice 3D

9.3 Simulace krytí

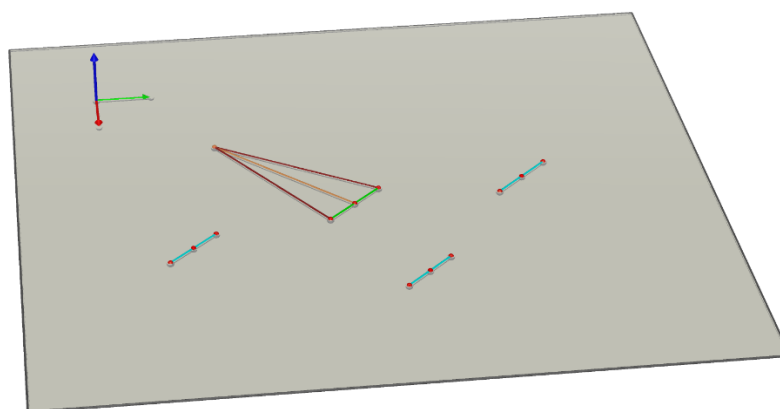
Obecně je možno modelovat krytí ve dvojrozměrném a trojrozměrném prostoru. Představme si nyní možné implementace pro obě kategorie modelů.

9.3.1 2D model

Ve dvojrozměrném modelu krytí je každá z osob v okolí bomby určena polohou (v rovině dané osami X a Y) a šířkou. Reprezentována je pak orientovanou úsečkou, jejíž délka je rovna šířce osoby a jejíž střed je bod polohy osoby.

Co se orientace týče, je nutné rozlišit dvě modelované role: testované osoby (která může být potencionálně kryta před účinky bomby) a okolostojící osoby (které mohou potencionálně testovanou osobu krýt). Pro testovanou osobu se pro zjednodušení předpokládá, že je vždy otočena přesně směrem k výbuchu. Tedy jí reprezentující orientovaná úsečka je kolmá na zornou linii (úsečku spojující polohu dané osoby a polohu bomby). Ostatní osoby pak mají přesně stejnou orientaci. To samozřejmě platí pro dané rozdělení rolí. Při jiném rozdělení rolí se pravděpodobně bude tato orientace lišit.

Nyní třem možným výsledkům testování krytí 2D modelu. Okolostojící osoba může testovanou osobu nezakrývat vůbec, zakrývat částečně, popř. zakrývat úplně. Zakrývá ji částečně, pokud jí reprezentující orientovaná úsečka protíná jednu ze dvou linií výbuchu (tj. úsečku spojující polohy bomby a jednoho ze dvou koncových bodů orientované úsečky reprezentující osobu). Zakrývá ji úplně, pokud protíná zornou linii testované osoby. Pravidlo pro úplné krytí má přednost před pravidlem pro krytí částečné.

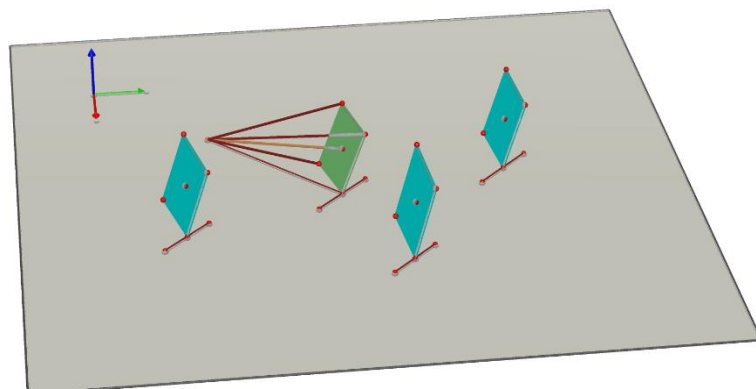


Obrázek 12 - 2D model krytí

9.3.2 3D model

V trojrozměrném modelu krytí je osoba reprezentována kosočtvercem (tedy dvojrozměrným útvarem). Jeho spodní vrchol leží v rovině určené osami X a Y a jeho delší osa je ke zmíněné rovině kolmá. Zornou linií je v tomto případě spojnice polohy bomby a středu kosočtverce. Linie výbuchu jsou pak čtyři, úsečky spojující polohu bomby a vrcholy kosočtverce.

Okolostojící osoba zakrývá testovanou osobu částečně, pokud kosočtverec reprezentující okolostojící osobu protíná jednu ze čtyř linií výbuchu. Zakrývá ji úplně, pokud protíná zornou linii testované osoby. Pravidlo pro úplné krytí má opět přednost před pravidlem pro krytí částečné.



Obrázek 13 - 3D model krytí

Naše simulace z důvodů komplexity výpočtů, náročnosti dalšího zpracování a vyhodnocení zahrnuje pouze výše popsany 2D model krytí.

10 Shrnutí výsledků simulací

Po základním zpracování několika tisíců běhů pro každé rozložení osob mohla vzniknout následující souhrnná tabulka.

	Rozložení	Podíl běhů, kdy více osob přežilo:		
		Při započtení krytí	Nelišilo se	Bez započtení krytí
1	Náhodné	33 %	39 %	28 %
2	Shluky	39 %	38 %	24 %
3	Řady	49 %	32 %	19 %
4	Fronta	56 %	25 %	19 %
5	Ulice	45 %	31 %	23 %

Tabulka 1 – Souhrnné výsledky

Tyto jednoduché popisné statistiky interpretujeme tak, že model 2D krytí, alespoň jak byl koncipován (a jak byly zvoleny jeho parametry) má poměrně malý vliv na snížení úmrtnosti osob v průběhu simulace. Pouze v případě jednoho rozložení (fronty) platilo, že ve většině běhů přežilo po započítání údajů o krytí jednoznačně více osob, než když nebylo krytí bráno v potaz.

Podívejme se nyní na podrobnější výsledky pro jednotlivá rozložení (vizte přílohy 2 až 6). Každá z hodnot v kontingenční tabulce odpovídá průměru hodnot ze 100 replikací se stejnými parametry simulačního modelu (ovšem s odlišnými hodnotami generovanými náhodnými funkcemi).

Největší průměrný podíl přeživších (nad 90 %) se objevuje u náhodného rozložení a rozložení do shluků. U těchto rozložení ale měly vliv spíše větší vzdálenosti osob od bomby než vzájemné krytí. Na rozdíl od výsledků Z. Usmaniho, E. Y. Imany a D. Kirka (2009) se jeví rozložení připomínající pohyb chodců na ulici jako druhé nejnebezpečnější, nikoliv jako nejnebezpečnější.

Použití v předchozím textu popsaného 3D modelu, variování různých výšek postav osob a stejných konstantních redukcí pro částečné a úplné krytí by mělo potenciál počet případů a míru krytí všech osob pouze snížit, nikoliv naopak. Na to ukazuje i výzkum Z. Usmaniho, E. Y. Imany a D. Kirka (2009). Pro použití jiných hodnot

redukcí maximálního přetlaku chyběly experimentální, a v podstatě i dostatečné teoretické podklady.

Opět dle výsledků Z. Usmaniho, E. Y. Imany a D. Kirka (2009) lze snad povšechným srovnáním odhadovat, že znatelně větší vliv by krytí mělo při modelování zranění střepinami.

11 Závěry a doporučení

Výsledky neukazují dostatečně na význam krytí při zásahu rázovou tlakovou vlnou. Jejich validita je ovšem ovlivněna komplexitou zvoleného problému, od které se odvíjí série více či méně nutných zjednodušení simulačního modelu. V ideálním případě by podobná simulace vyžadovala multioborovou spolupráci, která byla zmíněna v úvodu. Podstata hned několika modelovaných jevů je z definice mimo oblasti zájmu aplikované informatiky jako vědní disciplíny. Jde mj. o témata několika oborů fyziky, medicíny, v širším pojetí např. chemie či psychologie.

Krom toho se nedařilo získat dostatečně přesné informace o konkrétních bombových útocích pro smysluplné porovnání. U médií pro širokou veřejnost lze předpokládat důvody etické, bezpečnostní i jednoduše jiné priority žurnalistů. V odborných publikacích byly nalezeny zjevně velmi pokročilé modely, ale data o teroristických útocích prakticky pouze souhrnná.

Pokud pomineme výše uvedené překážky, jako hlavní zjednodušení se jeví u realizovaného modelu absence 3D modelu krytí, rozdílného natočení osob a absence zranění střepinami. Nálože sebevražedných útočníků zabíjejí spíše střepinovým efektem (Usmani a Kirk, 2011). V podstatě stejně důležité by bylo implementovat odrazy tlakové vlny i střepin.

Dále by bylo velmi vhodné využít aktivitu agentů reprezentující osoby pro generování jejich rozestavění. Aby vznikala rozestavění co nejvíce podobná přirozeným. Jedním z důvodů, proč k tomuto nebylo přistoupeno už od počátku, bylo mít právě v prvotním modelu maximální kontrolu nad všemi aspekty virtuálního prostředí.

Kdybychom implementovali všechna předchozí zlepšení, bylo by jistě přínosné zahrnout chování davu po výbuchu a produkovat tak např. data pro analýzu dostačivosti únikových východů budov. Software AnyLogic byl zvolen mj. proto, aby

toto potenciálně umožňoval, a jeho autoři knihovnu pro simulaci pohybu chodců dlouhodobě rozvíjejí.

12 Seznam použité literatury

1. BORŠČEV, A. V. *The big book of simulation modeling : multimethod modeling with AnyLogic 6*. [Lisle, IL] : AnyLogic North America, 2013. ISBN 978-0-9895731-7-7
2. AASTP-1. *Manual Of Nato Safety Principles for The Storage Of Military Ammunition And Explosives*, Ed. 1 Chg. 3 [online]. 2010. [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <http://www.rasrinitiative.org/pdfs/AASTP-1-Ed1-Chge-3-Public-Release-110810.pdf>
3. BANKS, J., Carson, J., Nelson, B. L. a Nicol D. *Discrete-event system simulation*. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. ISBN 780131446793.
4. BOWEN, I. G., FLETCHER, E. R. a RICHMOND, D. R. *Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast*. Albuquerque, NM: Lovelace Foundation for Medical Education and Research, 1968.
5. FEMA 426. *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings* [online]. 2003. [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://www.fema.gov/media-library/assets/documents/2150>
6. GORDON, C. C., CHURCHILL, T., CLAUSER, C. E., BRADTMILLER, B., MCCONVILLE, J. T., TEBBETTS, I. a WALKER, R. A. *Anthropometric Survey of U.S. Army Personnel: Summary Statistics, Interim Report* [online]. Anthropology Research Project Inc Yellow Springs OH, 1989 [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA209600>
7. HUSÁKOVÁ, M. *Vývojové nástroje pro multiagentové systémy: Znalostní technologie III materiál pro podporu studia* [online]. [2007]. [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: http://lide.uhk.cz/fim/ucitel/fshusam2/lekarnicky/zt3/zt3_dokumenty/MultiagentProst%20C5%99ed%C3%AD.pdf
8. KINNEY, G. F. a GRAHAM, K.J. *Explosive Shocks in Air* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985 [cit. 20.4.2019]. DOI: 10.1007/978-3-642-86682-1. ISBN 978-3-642-86684-5.
9. KUBÍK, Aleš. *Inteligentní agenty*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 80-251-0323-4.
10. KUPČÍK, J. *Statistická metoda Monte Carlo*: Diplomová práce. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2009. str. 72. Vedoucí diplomové práce Ing. Bronislav Chramcov, Ph.D. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/10535/kup%C4%8D%C3%ADk_2009_dp.pdf?sequence=1.

11. MCMICHAEL, L. D. *Incorporating the Bowen Survivability Curves into Blast Analysis*. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports [online]. 2011 [cit. 20.4.2019]. DOI: 10.2172/1068297. Dostupné z: <https://digital.library.unt.edu/ark%3A/67531/metadc839861/>
12. NetLogo 4.0.4 Uživatelská příručka. *Co je NetLogo?* [online]. [2010]. [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: http://www.robotomie.cz/pocitadlo/pridej_zaznam.php?navez=obsah/netlogo/netlogo.zip
13. ROY, Michael J. *Physician's guide to terrorist attack*. Totowa, N.J.: Humana Press, c2004. ISBN 1-59259-663-0.
14. SIEGFRIED, Robert. *Modeling and Simulation of Complex Systems* [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014 [cit. 20.4.2019]. DOI: 10.1007/978-3-658-07529-3. ISBN 978-3-658-07528-6.
15. Simulace.info. *Monte Carlo method/cs*. Poslední změna 15. 6. 2015. [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: http://www.simulace.info/index.php/Monte_Carlo_method/cs
16. TAN, D. K. *Blast injuries: 4 types fire, EMS providers need to know* [online]. 2017 [cit. 20.4.2019]. Dostupné z: <https://www.firerescue1.com/firefighter-training/articles/273858018-Blast-injuries-4-types-fire-EMS-providers-need-to-know/>
17. USMANI, Z. a KIRK, D. *Simulation of suicide bombing: using computers to save lives*. Bloomington, IN: iUniverse, [2011]. ISBN 978-1-4401-9441-2.
18. USMANI, Z., IMANA, E. Y. a KIRK, D. *Virtual Iraq - Simulation of insurgent attacks*. In: 2009 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Virtual Environments. [New York]:IEEE, 2009, s. 53-60. ISBN 978-1-4244-2772-7.

13 Přílohy

Příloha č. 1 - Mnohočleny pro výpočet parametrů tlakové vlny 1 kg TNT

Příloha č. 2 – Kontingenční tabulky pro rozložení Náhodné

Příloha č. 3 – Kontingenční tabulky pro rozložení Shluky

Příloha č. 4 – Kontingenční tabulky pro rozložení Řady

Příloha č. 5 – Kontingenční tabulky pro rozložení Fronta

Příloha č. 6 – Kontingenční tabulky pro rozložení Ulice

Příloha č. 7 – Struktura přiloženého CD

Mnohočleny pro výpočet parametrů tlakové vlny 1 kg TNT

Incident pressure (kPa)

Rozsah použitelnosti: 0,0674 m – 40,0 m

$$U = -0,214362789151 + 1,35034249993T$$

$$Y = 2,78076916577 - 1,6958988741U - 0,154159376846U^2$$

$$+ 0,514060730593U^3 + 0,0988534365274U^4$$

$$- 0,293912623038U^5 - 0,0268112345019U^6$$

$$+ 0,109097496421U^7 + 0,00162846756311U^8$$

$$- 0,0214631030242U^9 + 0,0001456723382U^{10}$$

$$+ 0,00167847752266U^{11}$$

Incident impulse (kPa/ms)

Rovnice I - Rozsah použitelnosti: 0,0674 m – 0,955 m

$$U = 2,06761908721 + 3,0760329666T$$

$$Y = 2,52455620925 - 0,502992763686U + 0,171335645235U^2$$

$$+ 0,0450176963051U^3 - 0,0118964626402U^4$$

Rovnice II - Rozsah použitelnosti: 0,955 m – 40 m

$$U = 1,94708846747 + 2,40697745406T$$

$$Y = 1,67281645863 - 0,384519026965U - 0,0260816706301U^2$$

$$+ 0,00595798753822U^3 + 0,014544526107U^4$$

$$- 0,00663289334734U^5 - 0,00284189327204U^6$$

$$+ 0,0013644816227U^7$$

Reflected Pressure (kPa)

Rozsah použitelnosti: 0,0674 m – 40 m

$$U = 0,24657322658 + 1,36637719229T$$

$$Y = 3,40283217581 - 2,21030870597U - 0,218536586295U^2$$

$$+ 0,895319589372U^3 + 0,24989009775U^4$$

$$- 0,569249436807U^5 - 0,11791682383U^6$$

$$+ 0,224131161411U^7 + 0,0245620259375U^8$$

$$- 0,0455116002694U^9 - 0,00190930738887U^{10}$$

$$+ 0,00361471193389U^{11}$$

Reflected Impulse (kPa / ms)

Rozsah použitelnosti: 0,0674 m – 40 m

$$U = -0,246208804814 + 1,33422049854T$$

$$Y = 2,70588058103 - 0,949516092853U + 0,112136118689U^2 - 0,0250659183287U^3$$

Shock Front Velocity (m/ms)

Rozsah použitelnosti: 0,0674 m – 40 m

$$U = -0,202425716178 + 1,37784223635T$$

$$Y = -0,06621072854 - 0,698029762594U + 0,158916781906U^2 + 0,443812098136U^3 - 0,113402023921U^4 - 0,369887075049U^5 + 0,129230567449U^6 + 0,19857981197U^7 - 0,0867636217397U^8 - 0,0620391900135U^9 + 0,0307482926566U^{10} + 0,0102657234407U^{11} - 0,00546533250772U^{12} - 0,000693180974U^{13} + 0,0003847494916U^{14}$$

Arrival Time (ms)

Rozsah použitelnosti: 0,0674 m – 40 m

$$U = -0,202425716178 + 1,37784223635T$$

$$Y = -0,0591634288046 + 1,35706496258U + 0,052492798645U^2 - 0,196563954086U^3 - 0,0601770052288U^4 + 0,0696360270981U^5 + 0,0215297490092U^6 - 0,0161658930785U^7 - 0,00232531970294U^8 + 0,00147752067524U^9$$

Positive Phase Duration (ms)

Rovnice I - Rozsah použitelnosti: 0,0178 m – 1,01 m

$$U = 1,92946154068 + 5,25099193925T$$

$$Y = -0,614227603559 + 0,130143717675U + 0,134872511954U^2$$

$$+ 0,0391574276906U^3 - 0,00475933664702U^4 \\ - 0,00428144598008U^5$$

Rovnice II - Rozsah použitelnosti: 1,01 m – 2,78 m

$$U = -2,12492525216 + 9,2996288611T \\ Y = 0,315409245784 - 0,0297944268976U + 0,030632954288U^2 \\ + 0,0183405574086U^3 - 0,0173964666211U^4 \\ - 0,00106321963633U^5 + 0,00562060030977U^6 \\ + 0,0001618217499U^7 - 0,0006860188944U^8$$

Rovnice III - Rozsah použitelnosti: 2,78 m – 40 m

$$U = -3,53626218091 + 3,46349745571T \\ Y = 0,686906642409 + 0,0933035304009U - 0,0005849420883U^2 \\ - 0,00226884995013U^3 - 0,00295908591505U^4 \\ + 0,00148029868929U^5$$

Kontingenční tabulky pro rozložení Náhodné

Náh. rozl - podíl přeživších - bez krytí						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	96,65%	96,90%	97,07%	96,81%	96,54%	96,79%
10	94,65%	94,45%	95,10%	94,76%	94,74%	94,74%
15	92,30%	92,90%	93,20%	93,28%	92,87%	92,91%
20	92,15%	91,83%	91,27%	92,05%	91,39%	91,74%
25	91,35%	89,43%	90,10%	89,58%	90,11%	90,11%
	93,42%	93,10%	93,35%	93,30%	93,13%	93,26%

Náh. rozl - podíl přeživších - s krytím						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	97,00%	96,90%	96,92%	96,80%	96,74%	96,87%
10	94,35%	94,50%	95,07%	94,79%	95,02%	94,74%
15	92,10%	92,83%	93,18%	93,21%	93,17%	92,90%
20	91,75%	92,08%	91,42%	92,30%	91,97%	91,90%
25	91,55%	89,63%	90,50%	89,94%	90,54%	90,43%
	93,35%	93,19%	93,42%	93,41%	93,49%	93,37%

Kontingenční tabulky pro rozložení Shluky

Shluky - podíl přeživších - bez krytí						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	97,20%	95,85%	97,00%	97,06%	96,49%	96,72%
10	95,65%	93,60%	94,90%	94,29%	95,20%	94,73%
15	92,35%	92,60%	93,13%	91,63%	92,40%	92,42%
20	89,55%	91,63%	91,35%	91,69%	91,74%	91,19%
25	87,60%	89,80%	89,55%	90,28%	90,15%	89,47%
	92,47%	92,70%	93,19%	92,99%	93,20%	92,91%

Shluky - podíl přeživších - s krytím						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	97,45%	96,18%	96,98%	97,22%	96,58%	96,88%
10	95,65%	93,83%	95,10%	94,64%	95,58%	94,96%
15	92,30%	93,13%	93,43%	92,60%	93,21%	92,93%
20	89,90%	92,33%	91,90%	92,13%	92,61%	91,77%
25	88,55%	90,63%	90,40%	91,08%	91,02%	90,33%
	92,77%	93,22%	93,56%	93,53%	93,80%	93,38%

Kontingenční tabulky pro rozložení Řady

Řady - podíl přeživších - bez krytí						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	96,10%	97,55%	93,87%	95,30%	95,24%	95,61%
10	85,60%	91,85%	87,23%	90,20%	89,43%	88,86%
15	79,45%	87,80%	82,58%	86,40%	84,68%	84,18%
20	77,05%	85,28%	79,68%	84,10%	81,66%	81,55%
25	74,80%	82,60%	77,22%	81,88%	79,35%	79,17%
	82,60%	89,02%	84,12%	87,58%	86,07%	85,88%

Řady - podíl přeživších - s krytím						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	96,25%	97,68%	94,62%	95,55%	95,81%	95,98%
10	85,70%	91,58%	87,95%	90,64%	89,66%	89,10%
15	79,60%	88,23%	84,25%	87,80%	85,75%	85,13%
20	78,10%	86,85%	82,18%	85,77%	83,67%	83,32%
25	76,10%	83,88%	79,32%	83,84%	81,05%	80,84%
	83,15%	89,64%	85,66%	88,72%	87,19%	86,87%

Kontingenční tabulky pro rozložení Fronta

Fronta - podíl přeživších - bez krytí						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	83,80%	79,23%	85,83%	88,95%	91,05%	85,77%
10	70,45%	68,88%	78,73%	83,73%	86,84%	77,72%
15	64,15%	62,18%	74,30%	79,58%	83,39%	72,72%
20	59,50%	57,00%	71,23%	73,58%	78,67%	68,00%
25	57,15%	54,23%	69,22%	69,58%	75,49%	65,13%
	67,01%	64,30%	75,86%	79,08%	83,09%	73,87%

Fronta - podíl přeživších - s krytím						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	83,90%	79,53%	86,20%	89,30%	91,25%	86,04%
10	71,05%	69,85%	79,20%	84,53%	87,28%	78,38%
15	64,05%	63,40%	75,37%	80,93%	84,64%	73,68%
20	59,90%	59,80%	73,08%	77,25%	81,78%	70,36%
25	58,75%	57,70%	71,48%	73,81%	78,73%	68,10%
	67,53%	66,06%	77,07%	81,16%	84,74%	75,31%

Kontingenční tabulky pro rozložení Ulice

Ulice - podíl přeživších - bez krytí						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	86,10%	92,05%	90,35%	92,52%	93,79%	90,96%
10	78,80%	87,38%	86,00%	88,85%	91,19%	86,44%
15	74,35%	83,93%	82,47%	86,24%	88,71%	83,14%
20	70,70%	81,10%	80,50%	83,01%	86,50%	80,36%
25	66,70%	79,40%	77,98%	79,88%	83,62%	77,52%
	75,33%	84,77%	83,46%	86,10%	88,76%	83,68%

Ulice - podíl přeživších - s krytím						
	počet osob					
hmot. nálože (kg)	20	40	60	80	100	
5	86,15%	92,05%	90,22%	92,41%	93,79%	90,92%
10	79,95%	87,70%	86,27%	89,20%	91,66%	86,96%
15	75,55%	84,58%	83,30%	86,96%	89,77%	84,03%
20	70,80%	82,38%	81,27%	84,31%	87,26%	81,20%
25	68,85%	80,35%	79,55%	81,96%	85,10%	79,16%
	76,26%	85,41%	84,12%	86,97%	89,52%	84,46%

Adresářová struktura přiloženého CD:

- Bakalarska-prace
 - o Bakalarska-prace-pavel-kujal.pdf – text bakalářské práce
- AnyLogic projekt
 - o AnyLogic-projekt.zip - kompletní AnyLogic projekt



Zadání bakalářské práce

Autor: Mgr. Pavel Kujal

Studium: I1600475

Studijní program: B1802 Aplikovaná informatika

Studijní obor: Aplikovaná informatika

Název bakalářské práce: **Využití agentových simulací pro minimalizaci ztrát při teroristickém útoku**

Název bakalářské práce AJ: The use of agent based simulations to minimize losses in a terrorist attack

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Student si zvolí jeden z teroristických útoků, který pečlivě zanalyzuje. Po rozboru útoku student vytvoří agentový model co nejděleji reprodukuje zvolenou událost. V první fázi simulací, bude mít student za úkol dosáhnout stejného efektu jako u zkoumané události. V druhé fázi pak bude pomocí what-if scénářů zkoumat, jakým způsobem by bylo možné minimalizovat ztráty při útoku. Témata k nastudování: agentové modely, vybraný teroristický útok
<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4926318/?part=1>

<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4926318/?part=1>

Garantující pracoviště: Katedra informačních technologií,
Fakulta informatiky a managementu

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Doležal

Datum zadání závěrečné práce: 21.10.2014