

Univerzita Hradec Králové

Fakulta informatiky a managementu

Katedra informačních technologií

Dynamika tekutin a agentové modely

Diplomová práce

Autor práce: Mgr. MICHAL NEKVINDA

Studijní obor: Aplikovaná informatika

Vedoucí práce: doc. RNDr. KAMILA ŠTEKEROVÁ, Ph.D., MSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedených informačních zdrojů.

.....

Michal Někvinďa

24. dubna 2024

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. RNDr. Kamile Štekerové, Ph.D., MSc., za vedení této práce a za cenné rady a komentáře, které mi během psaní práce poskytla. Dále děkuji své rodině za trpělivost a podporu během mého studia.

Abstrakt

Práce se zabývá propojením agentových modelů a modelů popisujících dynamiku tekutin. Spojení těchto dvou různorodých přístupů umožňuje popsat komplexní systém, ve kterém lze pozorovat chování skupiny agentů v závislosti na působení šířící se kapalné či plynné látky. Z praktického hlediska lze tento kombinovaný model použít pro širokou škálu různých situací, z nichž se tato práce věnuje evakuaci osob z prostředí zasaženého požárem.

Jednotlivé modelovací techniky jsou nejprve představeny samostatně včetně jejich základních vlastností a možností využití. Následně se práce věnuje možnostem a způsobům propojení modelovacích přístupů. Detailněji se zaměřuje na studium chování lidí v krizových situacích a jejich reakce v prostředí zasaženém požárem. Na základě načerpaných poznatků je navržen ukázkový model z reálného prostředí zachycující proces evakuace osob při požáru.

Pro modelování pohybu agentů je využit systém AnyLogic, který se na vstupu obohatí o data z programu Fire Dynamics Simulator popisující šíření požáru. Pomocí simulace dojde ke změření doby nutné pro evakuaci všech osob a zmapování vlivu požáru na jejich zdraví. Tím se experimentálně ověří připravenost evakuačních plánů, kapacita únikových cest a vliv chování osob na celkový průběh a úspěšnost evakuace.

Klíčová slova

agentové modely, fluidní dynamika, evakuace, požár

Abstract

Title: Fluid Dynamics and Agent-Based Models

The thesis deals with the connection between Agent-Based Models and Computational Fluid Dynamics modeling. Combining these two diverse approaches allows to describe a complex system in which the behavior of a group of agents can be observed

depending on the action of spreading liquid or gas. From a practical point of view, this combined model can be applied to a wide range of different situations, of which this work focuses on the movement and evacuation of people from a fire-affected environment.

The different modelling techniques are first introduced separately, including their basic characteristics and possible applications. Subsequently, the thesis discusses the possibilities and ways of linking the modelling approaches. It focuses in detail on the study of human behaviour in crisis situations and their reactions in a fire-affected environment. The knowledge gained is used to design a model from a real environment to illustrate the process of evacuation of people during a fire.

The AnyLogic software is used to model the movement of the agents, which is enriched at the input with data from the program Fire Dynamics Simulator describing the spread of the fire. The simulation will be used to measure the time required to evacuate all occupants and to map the impact of the fire on their health. This will experimentally verify the readiness of evacuation plans, the capacity of escape routes and the effect of occupant behaviour on the overall evacuation process and success.

Keywords

Agent-Based Model, Computational Fluid Dynamics, evacuation, fire

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Teoretická část | 3 |
| 2.1 | Modelování | 3 |
| 2.2 | Agentové modely | 5 |
| 2.3 | Modelování dynamiky tekutin | 8 |
| 2.4 | Propojení modelů | 9 |
| 2.5 | Chování lidí v krizových situacích | 13 |
| 2.6 | Softwarové nástroje pro ABM a CFD | 22 |
| 3 | Praktická část | 23 |
| 3.1 | Formulace problému a základní návrh modelu | 23 |
| 3.2 | Použité softwarové nástroje | 25 |
| 3.3 | Implementace modelu | 27 |
| 3.4 | Verifikace a validace modelu | 47 |
| 3.5 | Experimenty | 48 |
| 4 | Výsledky a diskuze | 65 |
| 5 | Závěr | 67 |
| | Literatura | 69 |
| | Seznam zkratek | 78 |
| | Přílohy | 79 |
| A | Obsah elektronické přílohy | 79 |

Seznam obrázků

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Schéma modelu dynamiky tekutin. | 10 |
| 2 | Plánek patra kancelářské budovy. | 24 |
| 3 | Návrh modelu. | 27 |
| 4 | Návrh prostředí – AnyLogic. | 28 |
| 5 | Návrh prostředí v programu Smokeview. | 36 |
| 6 | Ukázka ze simulace v programu Smokeview. | 36 |
| 7 | Možnosti přechodu mezi interními stavy agenta. | 40 |
| 8 | Tabulka teplotního indexu (zdroj obrázku [1]). | 43 |
| 9 | Grafické okno z průběhu simulace. | 47 |
| 10 | Umístění ohniska požáru. | 50 |
| 11 | Histogram pro zdraví jednotlivých agentů. | 51 |
| 12 | Histogram pro celkový čas evakuace jednotlivých agentů. | 52 |
| 13 | Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti pro jednotlivé počty agentů. . . | 53 |
| 14 | Časy evakuace pro jednotlivé počty agentů. | 53 |
| 15 | Rozmístění zdrojů požáru pro jednotlivé scénáře. | 54 |
| 16 | Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti pro jednotlivá ohniska požárů. . | 55 |
| 17 | Časy evakuace pro jednotlivá ohniska požárů. | 56 |
| 18 | Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti při různých vlastnostech požáru. . | 58 |
| 19 | Časy evakuace při různých vlastnostech požáru. | 59 |
| 20 | Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti při zapnutém a vypnutém alarmu. . | 60 |
| 21 | Časy evakuace při zapnutém a vypnutém alarmu. | 60 |
| 22 | Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti pro různá chování agentů. | 64 |
| 23 | Časy evakuace pro různá chování agentů. | 64 |

Seznam tabulek

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Parametry prostředí. | 24 |
| 2 | Datové struktury prostředí v programu AnyLogic. | 30 |
| 3 | Parametry modelu dynamiky tekutin. | 35 |
| 4 | Exportované soubory načítané po spuštění programu AnyLogic. | 37 |
| 5 | Datové struktury agenta v programu AnyLogic. | 38 |
| 6 | Nastavení náhodných proměnných. | 39 |
| 7 | Seznam aktivit pro jednotlivé typy chování. | 40 |
| 8 | Matice přechodu mezi jednotlivými aktivitami pro <code>NormalBehaviour</code> | 42 |
| 9 | Matice přechodu mezi jednotlivými aktivitami pro <code>AlarmBehaviour</code> | 42 |
| 10 | Matice přechodu mezi jednotlivými aktivitami pro <code>FireBehaviour</code> | 42 |
| 11 | Výchozí hodnoty parametrů experimentů. | 50 |
| 12 | Referenční hodnoty simulace. | 51 |
| 13 | Vliv počtu agentů. | 52 |
| 14 | Různá umístění ohniska požáru | 55 |
| 15 | Změněné parametry pro větší požár. | 57 |
| 16 | Změněné parametry pro menší požár. | 57 |
| 17 | Naměřené hodnoty při různých vlastnostech požáru. | 58 |
| 18 | Naměřené hodnoty při vypnutých požárních detektorech. | 59 |
| 19 | Změny v nastavení náhodných proměnných – ideální agent. | 61 |
| 20 | Matice přechodu mezi aktivitami pro <code>AlarmBehaviour</code> – ideální agent. | 62 |
| 21 | Matice přechodu mezi aktivitami pro <code>FireBehaviour</code> – ideální agent. | 62 |
| 22 | Změny v nastavení náhodných proměnných – nezodpovědný agent. | 62 |
| 23 | Matice přechodu mezi aktivitami pro <code>AlarmBehaviour</code> – nezodpovědný agent. | 63 |
| 24 | Matice přechodu mezi aktivitami pro <code>FireBehaviour</code> – nezodpovědný agent. | 63 |
| 25 | Naměřené hodnoty pro různá chování agentů. | 63 |

1 Úvod

Modelování patří k významným nástrojům pro řešení složitých systémů a procesů. Nabízí důležitou možnost zjednodušení reálného problému tak, aby jej šlo efektivně popsat a analyzovat s použitím již známých nástrojů, ale zároveň nedocházelo ke ztrátě podstaty řešeného problému. Využit se dá v mnoha různých oborech, například v ekonomii, sociologii, fyzice a dalších. Pomocí modelování dokáží lidé snáze chápat probíhající jevy a díky simulaci různých scénářů pak získat lepší představu o možném budoucím vývoji. V běžném životě se s ním denně setkává každý z nás, protože i lidský mozek si na základě vnímání okolního světa vytváří a ukládá tzv. mentální modely [2], podle kterých se pak dále řídí.

Agentové modelování (Agent-Based Model, či zkráceně ABM) je simulační technika, ve které dochází k analýze systému pomocí jednotlivých agentů s různými vlastnostmi a chováním. Agenti na sebe v tomto systému vzájemně působí, přičemž hlavním předmětem zájmu jsou projevy emergence. Lze ho velmi dobře aplikovat pro simulace každodenních jevů, nachází využití v mnoha oblastech lidské činnosti a je nedílnou součástí výzkumu v různých vědních oborech. Uplatnit ho lze například při řízení letového provozu [3], modelování šíření epidemií [4], analýze hrozeb na finančních trzích [5], či v archeologii [6].

Modelování dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics, neboli CFD) je vědecká oblast zabývající se metodami pro simulaci pohybu částic ve fluidních systémech. Opírá se o matematické modely, které popisují princip chování a zákonitosti z oblasti termodynamiky a hydrodynamiky. Tyto modely jsou následně implementovány do počítačových programů, které simulují proces pohybu tekutin v čase a prostoru. Pomocí modelů lze vyhodnocovat výsledky předpokládaných scénářů a studovat vliv různých faktorů, jako jsou tvar a velikost objektů, teplota, tlak nebo vodivost. Provedené výpočty umožňují lepší pochopení zkoumaných problémů a návrh optimalizovaných řešení. Tento druh modelování má široké praktické využití v různých průmyslových odvětvích, například při výpočtu optimálního chlazení strojních součástí [7], simulaci energetické účinnosti budov [8] nebo optimalizaci energie při sušení potravin a zemědělských produktů [9].

Cílem této práce je popsat možnosti propojení agentového modelování s modelováním dynamiky tekutin. Ukážeme, jak mohou být tyto přístupy kombinovány pro modelování složitějších systémů, které zahrnují tok tekutiny v prostředí, kde na sebe vzájemně působí větší množství agentů. Více se přitom zaměříme na oblast evakuace osob z prostředí zasaženého šířením požáru.

Na začátku práce se blíže seznámíme se základními principy a pravidly modelování. V dalších kapitolách se pak budeme podrobněji věnovat oblastem agentového modelování a modelům, které simulují pohyb tekutin. Popíšeme jejich základní principy, myšlenky a způsoby návrhu. Poté přejdeme k motivaci pro propojení obou výše představených technik do jednoho kombinovaného modelu a podíváme se na různé příklady prací, ve kterých byl tento postup aplikován. Důraz bude kladen na příklady z oblasti evakuačního plánování. Pro získání relevantních dat k vytvoření věrohodného modelu využijeme typické rysy chování lidí při krizových situacích.

V praktické části této práce implementujeme návrh vlastního modelu kombinujícího pohyb agentů v reálné kancelářské budově s modelem popisujícím šíření ohně. Připravíme počítačový experiment, ve kterém nadefinujeme soubor pravidel pro pohyb osob, charakteristiku požáru a budeme pozorovat emergenci tohoto systému. Zajímat nás bude celkový čas evakuace v závislosti na počtu osob a jejich chování, případná úzká hrdla evakuačních cest a míra expozice škodlivým látkám.

Ukázkový model vytvoříme v programu Anylogic, který nabízí široké možnosti a podporu pro definici různých typů agentů a rozličných grafů. Pro výpočty šíření požáru a kouře v prostředí použijeme software Fire Dynamics Simulator (FDS).

2 Teoretická část

2.1 Modelování

Tato kapitola si klade za cíl představit několik základních charakteristik modelování a podat stručné vysvětlení, z jakých kroků by se tvorba modelu měla obecně skládat. Informace vychází z knihy [10], kde lze také najít další podrobnosti.

Ústředním pojmem této problematiky je model. Jedná se o určitou formu abstrakce či zjednodušení popisu reality. K abstrakci je přistupováno proto, aby bylo možné zachytit její důležité aspekty, se kterými lze dále pracovat a blíže je pochopit. Způsob, jakým je zjednodušení provedeno, má velký vliv na výslednou užitečnost modelu. Vždy je důležité dbát na to, aby byl model v rámci možností co nejjednodušší, ale zároveň dokázal věrohodně zachytit účel, za kterým byl vytvořen. Dobrý model by si neměl klást za cíl být co nejpřesnější kopií reality. Naopak se musí zcela záměrně snažit o její zjednodušení, a to kvůli snadnému pochopení problematiky jeho fungování. Je-li model jednoduchý, dají se skrz něj dobře zachytit podstatné parametry, které jsou klíčové pro reálný problém.

K tvorbě modelu lze přistoupit několika způsoby. Pro výběr toho nejlepšího je potřeba brát vždy do úvahy to, co je v rámci modelování hlavním cílem. Základní způsoby využití jsou zpravidla následující.

- Návrh a řízení systémů – hlavním cílem je namodelovat a porovnat různé možnosti fungování, které jsou obecně k dispozici. V tomto případě se hlavní snaha upíná k co nejlepší reprodukci chování systému, který je navrhován.
- Předpověď chování – zde je typicky hlavní snahou získat představu o tom, jak by se mohl systém vyvíjet v budoucnu na základě dat a událostí, které se staly v minulosti.
- Porozumění problému – pokud je primární cílem pochopení složitého systému, o kterém existují jen omezené znalosti, je možné použít modelování k jeho porozumění a testování hypotéz, které jsou o něm na základě teoretických poznatků vytvořeny. Cílem není dokonalá reprodukce chování systému, ale spíše odhalení jeho hlavních principů. U komplexních systémů se pro tento typ požadavku používá modelování a simulace nejčastěji.

- Učení, trénink, zábava – model je vytvářen pro další osoby s cílem přiblížit reálný problém a dát jim možnost vyzkoušet si jeho zákonitosti. Složitost modelu by se měla volit vzhledem k cílové skupině uživatelů.

Dojde-li k ujasnění primárního účelu a cílů modelování a následně rozhodnutí konkrétní problém namodelovat, probíhá tento postup zpravidla v následujících několika krocích.

1. Formulace problému – ze všeho nejdříve je potřeba jasně nadefinovat problém, který se má řešit. Jednou z hlavních zásad by mělo být to, že nemodelujeme systém, ale modelujeme problém. Ten je nutné zachytit co nejkonkrétněji, nejlépe numericky. Musí se rovněž dobře zvážit míra abstrakce, časový horizont a výpočetní i finanční prostředky, které jsou k dispozici.
2. Základní návrh modelu – zde se určují jeho hlavní prvky a vytváří se mezi nimi vztahy. Obecně by měl být na začátku model popsán co možná nejjednodušeji s tím, že další detaily se přidají až ve chvíli, ukážou-li se jako opravdu nutné.
3. Implementace modelu – v tomto kroku dojde k určení konkrétního nástroje a druhu modelování. Následně se přistoupí k reprezentaci stavebních prvků modelu a hodnot parametrů prostředí.
4. Verifikace a validace – verifikací se ověřuje, zda model dělá opravdu to, co je na začátku zamýšleno. Jinými slovy zda konkrétní implementace odpovídá teoretickému návrhu. Validací se pak rozumí kontrola toho, zda vytvořený model reflektuje reálný problém, který byl na počátku vybrán k řešení.
5. Simulace a analýza – zde proběhne spuštění modelu a důkladné sledování jeho chování. Simulace by měla poskytnout odpovědi na otázky, které byly na začátku procesu stanoveny. Zároveň lze také narazit na zcela nové skutečnosti, se kterými původně nebylo počítáno.
6. Sumarizace výsledků – v této části je snaha o nalezení odpovědí na dříve položené otázky. Provádí se extrakce a sumarizace dat získaných ze simulace, na základě které se vytvoří zpravidla grafické či textové výstupy.

Při řešení reálných problémů má tato posloupnost kroků často tendenci měnit se v neustále se opakující cyklus, jelikož v jednotlivých krocích iterace dochází vlivem hlubšího pochopení problému k jeho reformulaci a restrukturalizaci. O konkrétních formách modelování, které budou v práci využity, pojednávají následující dvě sekce.

2.2 Agentové modely

Tato sekce se věnuje úvodu do problematiky modelování založeném na agentech (Agent-Based Model, ABM) a bližšímu popisu jeho jednotlivých částí.

ABM spadá do kategorie výpočetních modelů, jejichž výzkum se provádí simulací pomocí počítače. Využívá takzvaného přístup zdola nahoru. To znamená, že při modelování se nejdříve dívá na jednotlivé části systému (v tomto případě autonomně se rozhodující agenty) a definuje pravidla jejich chování. Vývoj celku a zpětná vazba z modelu je pak získána nepřímo jako důsledek interakce agentů v prostředí. Jedná se o zcela opačné paradigma, než bývá zpravidla využíváno v tradičním výzkumu ve společenských vědách. Zde se postupuje metodou od shora dolů se zájmem o celkovou strukturu systému a explicitní vyjádření zpětné vazby.

Výhodou agentového modelování oproti jiným metodám je schopnost modelovat chování mnoha jednotlivých agentů, a zároveň uchování jedinečnosti každého z nich. Modely také umožňují zohlednit náhodnost a nečekané změny v procesu chování jednotlivých agentů, což je často klíčové pro správnou simulaci složitých systémů.

Agentový model se skládá ze dvou následujících důležitých komponent.

- Agenti – každý z nich má svůj soubor vlastností a definované chování.
- Prostředí – prostor, ve kterém agenti realizují chování. Velmi často dochází i k interakci mezi agentem a prostředím, a proto má i tato komponenta nezanedbatelný vliv na chování agenta.

V další části bude každý z těchto bodů představen podrobněji.

2.2.1 Agent

Jak již bylo řečeno, základní jednotkou v agentových modelech je autonomně se rozhodující agent. Pro potřeby simulace se zpravidla využívá větší množství různých typů agentů s odlišným chováním a vlastnostmi.

Co se týče definice agenta, neexistuje zcela přesné vymezení tohoto pojmu. Podle Franklina a Graessera [11] je autonomní agent systém nacházející se v nějakém prostředí, jehož je součástí, a který vnímá toto prostředí a vykonává v něm akce za účelem plnění svých cílů a to tak, že ovlivňuje, co bude vnímat v budoucnu. Wooldrigde [12] uvádí, že agent je počítačový systém, který se nachází v nějakém prostředí, a který je schopen autonomních akcí v tomto prostředí za účelem splnění svých delegovaných cílů. Ještě obecnější definici lze nalézt od Russella a Norwiga [13], kteří agenta definují jako jakoukoli entitu, která vnímá okolní prostředí prostřednictvím sensorů a ovlivňuje ho pomocí akčních členů.

V případě potřeby formálního matematického uchopení je možné agenta popsat pomocí funkce $f : V^* \rightarrow A$, kde V je množina vjemů a A je množina akcí. Pro každý definovaný vjem $v \in V$ pak funkce f definuje akci $a = f(v)$, kterou daný agent v nastalé situaci při deterministickém chování provede. Více než samotná definice je však důležitější určitá představa o tom, jaký soubor vlastností by měl agent splňovat. V článku [14] zabývajícím se úvodem do této problematiky, jsou mezi základní prvky agentů řazeny tyto:

- Modularita – agent je diskrétní entita, která je dobře ohraničena a popsána svými vlastnostmi, takže je možné snadno říci, co vše je součástí agenta a co už nikoliv.
- Autonomie – agent se dokáže sám rozhodovat na základě vstupů z prostředí a od ostatních agentů.
- Společenskost – agent má schopnost interakce s ostatními. Typicky zde existuje nějaká forma vzájemné komunikace, nebo alespoň schopnost rozlišit, zda se nachází v blízkosti jiných agentů.
- Podmíněnost – agent má svůj vnitřní stav. Ten se mění na základě vnitřních atributů a podnětů z okolí. Způsob chování agenta se pak vždy odvíjí od jeho stavu.

Jedním z nejjednodušších agentů, se kterým se v modelování pracuje, je reprezentace agenta ve hře Life [15]. Zde se agentem rozumí buňka, která se nachází v jednom ze dvou stavů – živá nebo mrtvá. Svůj stav buňka odvozuje od stavu buněk v bezprostředním okolí. Příkladem sofistikovaného agenta je například program hrající deskovou hru, přičemž program se může v průběhu hraní učit a zdokonalovat.

Nedílnou součástí agentového modelování je kromě návrhu vlastností a charakteristik samotných agentů také definice jejich vzájemných vztahů. Právě schopnost správného propojení jednotlivých částí může dát dohromady fungující celek.

Základní myšlenkou vztahů mezi agenty je fakt, že agent může v daném čase interagovat jen s omezeným množstvím ostatních agentů z prostředí. Stejně tomu je i v praktickém životě, ve kterém lidé dokáží v jednu chvíli komunikovat nebo jinak spolupracovat jen s omezeným množstvím osob. Aby na sebe mohli agenti vzájemně reagovat, musí se v jistém slova smyslu nacházet blízko sebe. Tato relace bývá často vyjádřena pomocí vzdálenosti, takže například u celulárních automatů je uvažováno vzájemné působení buněk pouze u sousedních políček mřížky. U šíření virových nemocí se pak typicky předpokládá vzdálenost ve 3D prostoru. Ve virtuálním světě může být blízkost vyjádřena abstraktněji pomocí grafu. Týká se to např. propojení profilů na sociálních sítích nebo zájmových skupin sledujících jednu konkrétní webovou stránku. A z hlediska kupříkladu předávání genetických poruch bude vzájemná blízkost definovaná pomocí příbuznosti a mírou sdílení genetické informace.

Způsob a možnosti interakcí agentů do určité míry také podmiňuje prostředí, ve kterém se nachází.

2.2.2 Prostředí

Výzkum chování agenta se děje vždy v kontextu prostředí, do kterého je potřeba jej umístit. U prostředí je možné rozlišit několik charakteristik, které ovlivňují interakci s agenty.

- Pozorovatelnost – může být úplná nebo jen částečná. Při úplné pozorovatelnosti prostředí mají agenti dokonalou informaci o stavu světa, při částečné pozorovatelnosti dokáží vnímat jen určitou část svého okolí.
- Determinismus – prostředí může být deterministické nebo stochastické. V deterministickém určují jeho obraz pouze akce agentů, u stochastického dochází ke změnám bez ohledu na vůli agentů.
- Dynamičnost – rozlišovat se dá statické nebo dynamické prostředí v závislosti na tom, zda se mění mezi jednotlivými akcemi agentů. V dynamickém prostředí je pro agenta složitější plánovat akce, protože aktuální podoba světa se stále mění.

- Spojitost – rozlišuje se prostředí diskrétní nebo spojité z hlediska množství možných stavů, měření času atd.

2.2.3 Emergence

Hlavní motivací pro vytvoření modelu je snaha zachytit v systému projev emergence. Jedná se o důležité nebo zajímavé chování na úrovni celku, které nemá žádný přímý vzor v chování či pravidlech a vychází implicitně z interakcí jednotlivých částí (agentů).

Identifikovat toto chování ve výstupech simulace pak vydá na celou další oblast výzkumu. Emergenci lze ilustrovat už na velmi jednoduchých modelech, jakými jsou dříve zmíněný model Life či model Boids (simulace hejna). V obou případech se jedná o modely s agenty, kteří mají zcela jednoduchý systém pravidel, nicméně na úrovni systému vznikají velmi komplexní útvary a projevy samoorganizace.

2.3 Modelování dynamiky tekutin

Pomocí modelování dynamiky tekutin se dají vytvářet počítačové simulace toků kapalin a plynů, které poskytují velmi přesnou aproximaci skutečného chování v reálném prostředí. Vychází z fyzikálních poznatků a rovnic používaných v přenosu tepla či hmoty, případně modelů vytvořených z pozorování chování tekutin a empirických dat.

Tento druh modelování se zabývá způsobem, jakými lze fyzikální výpočty ve spojitěm prostoru převést do prostředí počítačů. Často se jedná o velmi komplexní a výkonově náročný soubor výpočtů vyžadující velmi výkonný hardware. Hlavní výhody, které modelování přináší oproti klasickým fyzikálním experimentům, jsou následující.

- Cena – modelování a následná simulace experimentu je levnější, protože kromě výpočetního výkonu nespotřebovává žádné jiné zdroje a pro svoje provedení nepotřebuje speciální prostředí ani laboratorní vybavení.
- Rychlost a opakovatelnost – modelování pomocí počítače je zpravidla rychlejší, a to zejména ve chvíli, kdy je třeba podobný typ experimentu provádět opakovaně s různými dílčími úpravami. Zároveň lze stejný pokus mnohokrát zopakovat se stejným nastavením, což je v reálných podmínkách velmi obtížně proveditelné.

- Jednodušší pozorování a analýza – během simulace je možné její průběh zpomalit či zastavit a věnovat pozornost studiu dalších informací a hodnot jiných veličin, které jsou součástí experimentu.
- Bezpečnost – v neposlední řadě je tento přístup bezpečnou alternativou v případech, kdy jsou předmětem výzkumu látky zdraví škodlivé, hořlavé nebo výbušné.

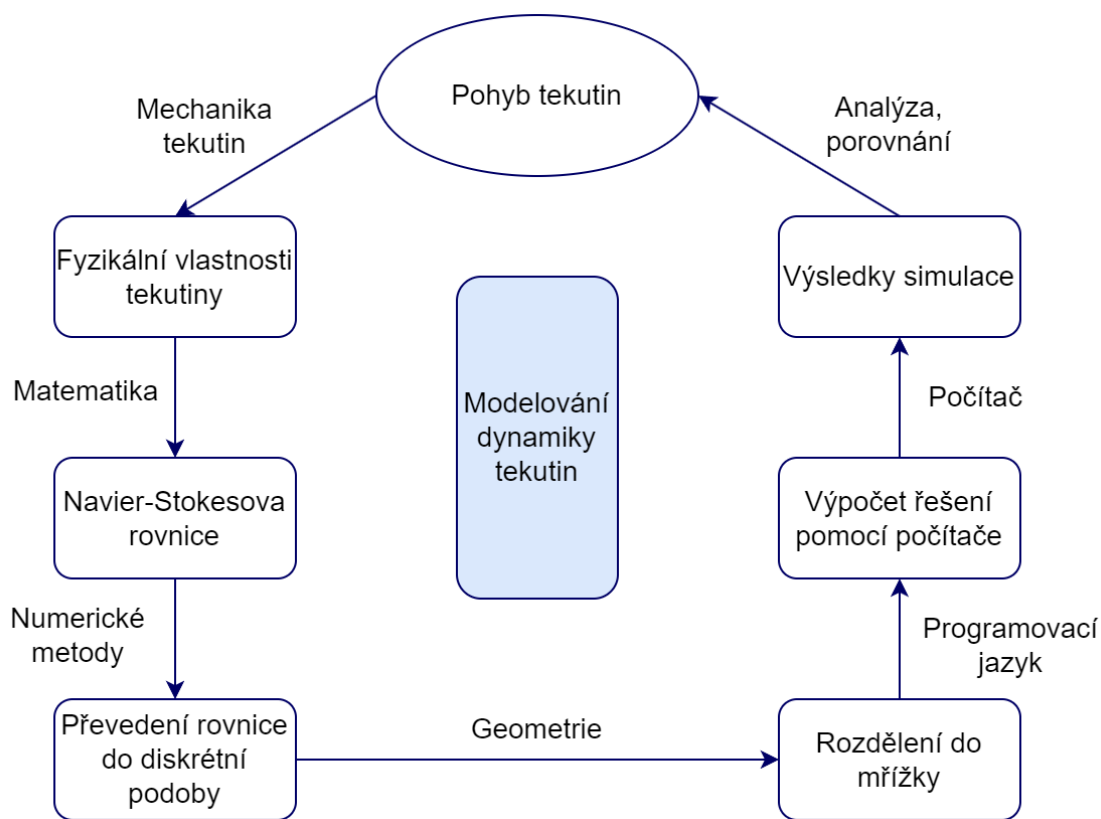
Základní princip modelování dynamiky tekutin se dá obecně shrnout do následujících několika kroků.

1. Určení fyzikálních vlastností tekutiny – zde hrají klíčovou roli teoretické poznatky z oblasti mechaniky tekutin.
2. Sestavení matematických rovnic, které popisují proudění vybrané tekutiny v prostoru, konkrétně se jedná o soustavu nelineárních parciálních diferenciálních rovnic (Navier-Stokesova rovnice).
3. Převedení rovnic do diskrétní podoby pomocí numerických metod, aby bylo možné vyřešení pomocí počítače.
4. Rozdělení domény do mřížky, aby bylo možné problém řešit po malých částech tak, jak vyžaduje diskretizace.
5. Sestavení počítačového programu na řešení rovnic.
6. Vyřešení rovnic – jedná se o výpočty, které jsou výkonnostně velmi náročné.

Získané výsledky simulace se dají podrobit analýze a porovnat se skutečnými fyzikálními experimenty. Celý průběh tohoto procesu graficky znázorňuje obrázek 1.

2.4 Propojení modelů

Tato část podává přehled o možnostech, které nabízí propojení agentových modelů s modelováním dynamiky tekutin. Na několika praktických příkladech jsou ukázány různé způsoby, jak se k této problematice dá přistupovat a také výhody, které kombinace přístupů může přinášet.



Obrázek 1: Schéma modelu dynamiky tekutin.

Existuje několik typických scénářů, kdy je možné indikovat společné použití výše zmíněných modelovacích technik. Nejčastěji se jedná o situace, ve kterých vzniká potřeba simulovat pohyb většího množství agentů v prostředí implicitně obsahujícím pohyb tekutiny. Zároveň také platí, že pro přesnost výsledků je důležité, aby vzájemné působení mezi agentem a prostředím bylo co možná nejrealističtější.

Interakce agenta s prostředím má velkou důležitost ve chvíli, kdy tento vztah výrazněji zasahuje do chování a rozhodování agenta. Není tedy nutné brát do úvahy proudění vzduchu v místnosti, je-li předmětem zkoumání například vývoj počtu lidí čekajících ve frontě u přepážky. Na druhou stranu vliv šířícího se požáru lze zcela jistě označit za zásadní pro výběr únikového východu, protože místo nacházející se v ohnisku požáru je pro člověka v danou chvíli nedostupné. Z tohoto důvodu se musí hned na počátku pečlivě zvážit, zda bude zakomponování nástrojů ze světa dynamiky tekutin do agentového modelu přínosem či nikoliv. Odpověď na tuto otázku může zpravidla poskytnout fáze validace modelu.

Dalším scénářem, kdy má smysl o spojení modelů uvažovat je situace, ve které jde primárně o pohyb tekutiny, jenž je opět výrazněji ovlivněna změnami v okolním prostředí. V některých případech proto dává smysl modelovat tyto jevy pomocí agentů, což pomáhá k lepší modelaci proudící kapaliny či plynu. Může se například jednat o změnu tvaru koryta řeky vlivem působení drobných živočichů, nebo změnu proudění vzduchu kvůli nahromadění překážek v určitých místech.

Tento přístup kombinace modelů se s úspěchem používá napříč různými obory, z nedávné doby lze zmínit například článek [16], ve kterém autoři popisují simulaci přenosu viru SARS-CoV-2 nebo práci [17] z oblasti hematologie modelující proudění krve při ateroskleróze. Zatímco v prvním případě hraje primární roli simulace pohybu agentů, ve druhém je klíčovým pozorovaným jevem dynamika tekutiny.

Dále se bude práce zabývat oblastí týkající se evakuace osob z prostředí, které bylo zamořeno určitým typem nebezpečné látky. Hlavním důvodem této kombinace je fakt, že se jedná o velmi přirozené spojení, ze kterého je jasně vidět důležitost použití CFD. Vliv šíření látky má v případě evakuace velkou roli na chování lidí a vznik různých zranění a škod, tudíž je potřeba umět je modelovat co nejpřesněji. Ačkoliv je pochopitelně možné definovat nějakou jednoduchou aproximaci v modelu s agenty [18], může výsledný výstup velmi zlepšit, je-li použit nástroj, který je z fyzikálního hlediska věrohodnější. I z tohoto důvodu se jedná o jeden z nejčastějších modelovaných případů kombinace agentového a fluidního modelu.

Zároveň se jedná o oblast, která je velmi aktuální a důležitá na pochopení. Ve světě okolo nás se každý den mnoho lidí ocitá v situacích, ve kterých dochází ke koncentraci většího množství osob v různých společných prostorech. Mít k dispozici předem připravený evakuační plán patří dnes již k základním bezpečnostním standardům, které by měl splňovat každý objekt sloužící k hromadnému setkávání osob.

2.4.1 Evakuace osob z nebezpečného prostoru

Jednu z prvních analýz, která se zevrubně věnuje možnostem spojení modelů pro potřeby evakuačního plánování lze nalézt v článku [19]. Autoři zde díky kombinaci obou přístupů zkoumali, jak reagují velké populace agentů v prostředí, kde se šíří kontaminant v podobě aerosolu. Cílem bylo demonstrovat použitelnost tohoto přístupu v praxi, a to na příkladu města Los Angeles. Agentový model zachycoval město včetně

jeho budov, infrastruktury a odpovídajícího počtu lidí (agentů), kteří se zde pohybovali. Model dynamiky tekutin simuloval uvolnění 1000 kilogramů aerosolu na dálnici poblíž města a jeho šíření směrem k němu. Pro tento účel je použití výpočtů z oblasti dynamiky tekutin velmi užitečné, protože dává reálný obraz o tom, kolik času je za daných klimatických a povětrnostních podmínek k dispozici pro evakuaci.

V článku jsou zkoumány dva různé evakuační plány. V prvním z nich byl modelován případ, ve kterém proběhla evakuace všech agentů mimo město. Ve druhém případě byl model změněn tak, že agenti nacházející se uvnitř budov zde zůstali (předpokládalo se, že budovy poskytují plnou ochranu vůči aerosolu) a z města se evakovali pouze ti, kteří byli v době úniku nebezpečné látky venku. Osoby město opouštěly výlučně pomocí automobilů.

Na základě experimentu bylo zjištěno, že v prvním scénáři došlo kvůli masové evakuaci k dopravním zácpám, protože infrastruktura města není na takový nápor připravena. Špatná průjezdnost měla za následek delší pobyt v exponovaném prostředí, což vedlo ke značným škodám na zdraví lidí. Ve druhém případě se díky úkrytu v budovách podařilo množství lidí na komunikacích snížit, což mělo pozitivní vliv na způsobené škody. Důležitým pozorováním učiněným pomocí simulace byl také fakt, že i v případě, kdy budovy neposkytují stoprocentní ochranu proti aerosolu, má z hlediska ochrany života a zdraví lidí větší smysl zůstat v budově. Tato alternativa je lepší než dlouhodobé vystavení škodlivinám na ulici během snahy o opuštění města. Výsledkem bylo rovněž potvrzení použitelnosti tohoto přístupu v praxi a výhod, které využití fluidní dynamiky do agentového modelu přináší.

Komplexní analýzu na propojení modelů pro simulaci evakuace osob z uzavřených budovách lze nalézt v článku [20]. Jeho cílem bylo navrhnout a popsat systém, který by mohl věrohodně simulovat dopady šíření nebezpečné látky v prostoru budov, které jsou popsány svým informačním modelem (BIM). Důraz byl kladen na co největší věrohodnost a přiblížení realitě, a proto se navržené řešení snaží zohlednit také interakce mezi šířící se látkou a jednotlivými prvky obsaženými v informačním modelu budovy.

Nejprve jsou představeny jednotlivé části systému určeného pro simulaci, které byly v práci použity. Jako nejefektivnější se ukázalo propojit již existující modely a programy pro CFD, ABM a BIM. Pro popis šíření látek byl použit algoritmus založený na technice Fast Fluid Dynamics [21]. Simulace pohybu osob byla namodelována programem

AnyLogic. Data se z CFD modelu přenášela do prostředí s agenty pomocí voxelů. Informační model budovy byl založen na standardu IFC (ISO 16739). Komunikaci mezi jednotlivými částmi zajišťoval speciálně naprogramovaný kontrolér, který se zároveň staral i o jejich aktualizaci. Dosažené výsledky v rámci výzkumného projektu iSiGG¹ pak potvrdily použitelnost a validitu této metody v praxi.

Z dalších aplikací v poslední době je možné zmínit například článek [22], ve kterém byla kombinace modelů použita pro vytvoření standardních postupů při evakuaci osob na studentských kolejích. Zkoumány byly čtyři různé scénáře a posuzováno bylo, jestli je evakuační systém budovy dostatečný a zda umožní její bezpečné opuštění všem obyvatelům. Tento typ budovy byl vybrán z hlediska jeho velké komplexnosti. Jedná se totiž typicky o hojně obydlenou budovu, která má v různých časových obdobích velmi rozdílnou hustotu osídlení. Pro simulaci byly využity komerční programy PyroSim a PathFinder. V rámci této studie byly pomocí simulace definovány standardní operační postupy evakuace osob z vysokoškolských kolejí s přiměřenou univerzálností pro podobné typy budov.

Z dalších příkladů lze uvést články [23], [24] nebo [25].

2.4.2 Zaměření na chování agentů

Přesto, že na toto téma bylo napsáno velké množství vědeckých článků a publikací, existuje stále mnoho neprobádaných oblastí, které čekají na podrobnější výzkum. V rámci tvorby ukázkového modelu se tato práce bude snažit danou oblast obohatit větším důrazem na popis agentů. Ten by měl vhodně reflektovat skutečné vzorce chování lidí v nenadálých a život ohrožujících situacích. Následující část 2.5 přináší hlubší ponoření do této problematiky, které pomáhá pochopit, jakým způsobem lidé přemýšlí a co v takových situacích dělají.

2.5 Chování lidí v krizových situacích

Důležitou součástí implementace modelu je definice chování jednotlivých agentů se snahou o co největší přiblížení se realitě. Tato část se proto zaměřuje na oblast mapující způsob chování lidí v rámci krizových situací vyžadujících evakuaci s důrazem na požáry. Na základě každodenních pozorování lze totiž očekávat, že se lidé dopouští

¹<https://www.simplan.de/en/research/research-project-isigg/>

ne zcela racionálních jednání a řídí se na základě různých instinktů či adaptují vzorce chování ze svého okolí.

Problematika je velmi komplexní a ovlivňuje ji mnoho faktorů. Současná znalost o chování lidí během incidentů je stále relativně omezená. Například je poměrně dobře známo a zmapováno, jak se lidé chovají, ale jen velmi málo se ví o tom, proč se tak chovají. Práce si neklade za cíl provádět vlastní výzkum v této oblasti, důležité je ale v tomto kontextu alespoň stručně zmapovat a předložit výsledky existujících vědeckých prací. Na jejich základě poté mohou vyplynout zajímavé poznatky, které se dají použít při samotné implementaci modelu.

Na úvod bude představen stručný souhrn nejvýznamnějších překážek vycházející z článků [26], [27] a [28], se kterými se modelace chování lidí musí potýkat. Z tohoto důvodu mohou z různých experimentů vyplynout rozdílné výsledky, takže není jednoduché určit optimální model pro konkrétní situaci.

- Složitost a variabilita lidského chování – obecně lze říci, že každý člověk je svým způsobem unikátní, a proto se jeví jako obtížné nalézt univerzálních pravidla chování dobře reprezentující celou populaci. Svou roli zde může sehrát například počet lidí, jejich věk, znalost prostředí, předchozí zkušenost s podobnou situací apod.
- Ovlivnění jednotlivce davem – i v případě, kdy by se podařilo namodelovat a popsat chování jednotlivců, bude jejich výsledné jednání vždy do určité míry ovlivněno chováním ostatních lidí ve skupině. Typicky zde totiž vznikají projevy emergence, které se nedají zachytit v chování jednotlivců ale pouze na úrovni celku.
- Závislost chování osob na kontextu – při hromadných shromážděních je nutné zohlednit typ populace a účel setkání. Rozdílné chování se dá očekávat např. při sportovní události, na hudebním festivalu nebo na politickém protestu. Důležité je také rozlišovat mezi různými typy rozhodnutí o pohybu za normálních okolností a ve stresových situacích, kdy je potřeba čelit bezprostřednímu nebezpečí. Někdy je i v rámci nouzové situace třeba rozlišovat mezi různými zdroji nebezpečí (např. požár, teroristické útoky atd.), protože mohou vyvolat různé reakce. To vše ztěžuje navrhování univerzálních modelů s plně obecnou použitelností.

- Různorodost prostředí – prostředí, ve kterém se dav lidí nachází, může mít vysokou variabilitu. Od úzkých uliček a malých místností až po velká a otevřená prostranství. V úvahu přichází budovy s více patry, různými typy a šířkou dveří, oken a různou možností pohybu (výtah, eskalátory, schody). To je daleko komplexnější prostředí než v případě pohybu v dopravní síti, která má mnohem pravidelnější strukturu.
- Pohyb osob v prostoru je spojitý – na rozdíl od pohybu vozidel a dalších dopravních prostředků, které jsou omezeny návrhem dopravní infrastruktury a dopravními předpisy, je pohyb chodců v budovách nebo ve městských oblastech mnohem flexibilnější – autem např. za normálních situace nemůžeme jet mimo komunikace ani v protisměru. Prostor pro pohyb je kromě pevných překážek prakticky neomezený. Chodci mají také oproti automobilům více stupňů volnosti a mohou snadněji navštěvovat stejná místa a nepřetržitě měnit svá rozhodnutí v čase.
- Omezenost empirických dat – nezbytným požadavkem úspěšného modelování v této oblasti je dostatek nasbíraných dat a provedených pozorování. Tato data mohou pocházet z přirozeného prostředí nebo z experimentů. Přirozená pozorování však nemusí nutně stačit k pokrytí celého rozsahu zkoumaného jevu, či být ve vhodném stavu pro podrobnou analýzu. Problémem je rovněž jejich obtížná dostupnost. U provádění experimentů se zase setkáváme s tím, že jsou často velmi nákladné (zejména mají-li se dělat s velkým počtem účastníků). Je také sporné, zda lze výsledky získané v laboratorních podmínkách přenést do reálných scénářů. U některých témat souvisejících s chováním v nouzových situacích bývá experimentátor rovněž omezen etickými otázkami.

V návaznosti na poslední bod je dobré si uvědomit a pochopit problematiku získání empirických dat. Na základě článku [26] analyzujícího více jak 150 prací s experimenty v této oblasti by se dalo rozlišit několik základních možností, z nichž každá má svá specifika.

- Experimenty se zvířaty – tento způsob se hodí v případě, kdy se výzkum primárně zaměřuje na chování davu jako celku a zároveň není možné z bezpečnostních důvodů využít lidských figurantů. Pokusy se dle odborné literatury nejčastěji provádí s myšmi a mravenci.

- Experimenty s lidmi v laboratorních podmínkách – oproti předchozímu přístupu přináší možnost více zkoumat chování a motivace jednotlivců, které bývá mnohdy složité. Díky předem známým podmínkám a faktu, že účastníci nečelí opravdovému nebezpečí mohou být data tímto směrem zkreslená. Způsob je vhodný například na podrobné studování pohybu lidí při evakuacích, protože před experimentem mohou být vybaveni senzory zaznamenávajícími dodatečná data.
- Experimenty ve virtuální realitě – zde je velkou výhodou možnost nasimulovat prakticky libovolné prostředí a stejně jako v předchozím případě zkoumat lidské chování v krizových situacích bez reálného ohrožení. Rovněž se nabízí možnost přizpůsobovat nastavení experimentu za jeho běhu v reakci na chování účastníka. Na druhou stranu je nutné počítat s tím, že nebude docházet k fyzickému kontaktu s reálnými osobami, což může opět výrazněji zkreslit výsledky.
- Dotazníkové šetření s účastníky – kromě experimentů nebo pozorování je také možné získávat informace od osob, které byly přímými účastníky krizových situací a mají osobní zkušenosti v této oblasti. Tato metoda kombinuje práci v terénu a laboratoři, protože lidé se nacházejí v reálných situacích, ale informace se získávají a strukturují způsobem, jaký navrhne experimentátor.

Přestože tato metoda umožňuje získat vzácné poznatky, které nelze dosáhnout pomocí experimentálního přístupu, je zde určitý nedostatek ve spolehlivosti informací. Záleží na tom, v jakém rozsahu si zpovídané osoby dokáží vzpomenout na událost, kterou zažily a do jaké míry jsou jejich odpovědi ovlivněny formulací a strukturou otázek. Navíc i rozsah jevů, které lze zkoumat, je poměrně omezený.

- Cvičné evakuace – při nácviku evakuace dochází k simulaci dané situace v reálném prostředí, kde by mohlo ke katastrofě dojít. Na druhou stranu jsou ale osoby s celou situací předem obeznámeny, takže opět nedochází k přirozenému rozvoji paniky a stresu.
- Analýza přírodních katastrof – cenné informace lze vyvodit i při zpětné analýze situací, které se staly dříve v minulosti. Na rozdíl od předem připravených experimentů je zajištěno, že chování účastníků bylo autentické a nemohlo být nijak zkresleno vlivy, které se vyskytují v laboratorních podmínkách. Negativem je pak

například to, že se jedná vždy o velmi specifické situace, které jsou z povahy věci neopakovatelné. Nedá se tedy říci, že by šlo o pravidlo opakující se v daných typech situací. Zároveň je třeba pracovat s pozorováními, která jsou neúplná či zkreslená. Problematický může být i samotný přístup k datům, jelikož jsou součástí vyšetřování a jejich zveřejnění musí povolit příslušné úřady.

Nyní již k samotným pozorováním, která byla experimentálně ověřena různými metodikami výzkumu. Práce se zaměřuje na pět hlavních oblastí, které mohou v největší míře ovlivnit výsledné chování. Uvedená zjištění poslouží jako inspirace při návrhu agentů do ukázkového modelu v praktické části. Zároveň se bude jednat o nástroj pro validaci agentové části modelu.

Jelikož není v možnostech této práce naplánovat vlastní experiment ověřující funkčnost modelu, bude se při validaci spoléhat na to, že chování agentů je v souladu s experimenty učiněnými v dostupných člancích zabývajících se podobným či stejným tématem.

2.5.1 Způsob a rychlost reakce

Styl chování a způsob uvažování každého jedince v běžných situacích a při hrozícím nebezpečí se bude zajisté lišit. Ke změně však nedochází v důsledku vnějších dějů, ale na základě vnitřní interpretace v mozku každého z nich. Pokud o bezprostředním nebezpečí neví, chová se tak, jakoby žádné nebezpečí nehrozilo a naopak. Existují situace, kde nastává panika a davové šílenství, které nemá s objektivními skutečностями žádnou souvislost.

V případě reakcí na evakuace se v odborné literatuře pracuje se dvěma důležitými časovými intervaly, jejichž definice uvádí norma ČSN EN ISO 13943.

- *Mezní doba pro bezpečný únik (ASET)* – doba využitelná pro únik pro jednotlivou osobu. Jedná se o vypočtený časový interval mezi okamžikem vznícení/zapálení a časem, ve kterém se podmínky stávají takovými, že se osoba považuje za nezpůsobilou k úniku.
- *Požadovaná doba pro bezpečný únik (RSET)* – vypočtená doba, kterou potřebuje každá osoba, aby dospěla z místa, kde se nachází v době zapálení/vznícení do bezpečného místa.

Evakuace se označuje za úspěšnou, pokud $RSET < ASET$. Co se týče výpočtu RSET, používá se zpravidla následující rovnice [29]:

$$RSET = t_{detection} + t_{alarm} + t_{pre-movement} + t_{travel}. \quad (1)$$

Jednotlivé členy rovnice mají následující význam:

- $t_{detection}$ – doba od vzniku požáru po jeho detekci protipožárním systémem,
- t_{alarm} – doba od detekce požáru po aktivaci alarmu,
- $t_{pre-movement}$ – doba od spuštění alarmu po začátek evakuace osob,
- t_{travel} – doba potřebná pro evakuaci.

První dva časové údaje závisí na kvalitě a citlivosti protipožárního systému. Doba potřebná pro evakuaci je závislá na parametrech evakuovaného objektu (vzdálenosti, počtu nouzových východů). Časový interval $t_{pre-movement}$ je dán subjektivním vyhodnocením nebezpečí jednotlivých osob a ze všech intervalů bývá asi nejhůře predikovatelný.

Lidé totiž mají tendenci nebezpečí nejdříve ověřit, namísto toho, aby okamžitě přistoupili k evakuaci. Teprve jsou-li nashromážděné informace dostatečně přesvědčivé, přistoupí k akci. Na základě dat různých typů experimentů (cvičné evakuace, laboratorní experimenty, zpětná analýza katastrof) vyhodnocených v článcích [30] a [31] bylo zjištěno, že jako nejpřesvědčivější motiv k okamžité evakuaci působí viditelnost plamenů a přítomnost kouře. Naopak pouhý zvuk alarmu často není jasným signálem, na který lidé reagují. V případě, kdy zvukový signál zaregistrují, mnoho z nich ještě nějakou dobu pokračuje ve své běžné činnosti. Tři nejčastější reakce, které v rámci výzkumu prováděného dotazníkovým šetřením [32] respondenti deklarovali, byly získání dalších informací, snaha o uhašení ohně a úplná ignorace. Okamžitá evakuace byla v pořadí nejčastějších odpovědí až na pátém místě.

Při sérii experimentů odehrávajících se ve virtuální realitě bylo změřeno, že průměrná doba, kterou lidem trvalo uvědomit si, že se mají začít evakuovat zabrala asi čtvrtinu času z celkové doby evakuace [33]. Riziko ignorování výstražných zvukových signálů se zvyšuje také u lidí, kteří v minulosti zažili situace, které skončily planým poplachem [32].

2.5.2 Změna rychlosti pohybu

Ve chvíli, kdy si lidé přítomnost požáru uvědomí, dojde při „přepnutí“ do módu evakuace také ke změně rychlosti pohybu. Na jedné straně vznikne přirozená vnitřní potřeba opustit prostor co nejrychleji, na straně druhé bude docházet k obecnému zpomalování pohybu davu v důsledku nastalého chaosu. Paradoxně tedy povede úsilí jednotlivců o co nejrychlejší pohyb k celkově pomalejšímu pohybu, než by byl dav schopen dosáhnout v případě, kdy by nebyl k vyšší rychlosti ničím motivován. Tento efekt, který byl pozorován jak u lidí [34], tak i při experimentech se zvířaty [35] se v odborné literatuře nazývá „faster-is-slower“.

Dalším faktorem ovlivňujícím rychlost pohybu člověka je přítomnost kouře. Jeho hlavním negativním efektem je snížená viditelnost, která má za následek obtížnější orientaci v prostoru. V článku [36], který se věnuje analýze tohoto problému vychází z laboratorních experimentů a cvičných evakuací následující empirický vzorec, kde r je výsledná rychlost (m/s), v představuje viditelnost (m) a r_{normal} je rychlost (m/s) za normálních podmínek:

$$r = \min(r_{normal}; \max(0, 2; r_{normal} - 0,34 * (3 - v))). \quad (2)$$

Naopak zde nebylo prokázáno, že by rychlost měla významně záviset na věku, pohlaví, výšce účastníků nebo na povrchu, po kterém se lidé pohybovali. V závislosti na vlastnostech prostředí se rychlost mění zpravidla tak, že nejlepší pro evakuaci jsou dlouhé rovné cesty, naproti tomu pravoúhlé zatáčky způsobují tvoření front a ztrátu plynulosti pohybu. Ke zpomalování dochází i v místě křížení cest a v úzkých hrdlech, což jsou například úzké dveře či různé zátarasy [37]. Nejvíce k tomuto chování dochází ve chvílích, kdy se lidé snaží pohybovat co nejrychleji (již dříve zmíněný efekt faster-is-slower).

V neposlední řadě může mít na výslednou rychlost vliv aktuální zdravotní stav. V místnosti zasažené požárem bude člověk nucen čelit vysokým teplotám a také inhalaci škodlivých látek obsažených v kouři. Tyto faktory jsou ještě krátce rozebrány v části 2.5.5.

2.5.3 Způsob hledání únikové trasy

Poté, co bylo zmapováno chování před začátkem evakuace ($t_{pre-movement}$) a odhadnutá rychlost pohybu v době evakuace ($t_{movement}$) se zbývá podívat na přístup k volbě evakuačních tras. Při něm bývá často zmíněn fenomén použití známé únikové cesty – lidé mají tendenci opouštět budovu po stejné trase, jakou do ní přišli [38]. Tento způsob chování byl pozorován při sérii experimentů simulujících požár v reálném hotelovém objektu. Jedná se zřejmě o uplatňování naučené rutiny, zvýšení pocitu jistoty a strachu z neznámého. Na druhou stranu při jiných studiích ve virtuální realitě tento předpoklad potvrzen nebyl a větší vliv na rozhodování testovaných subjektů měla sociální interakce s ostatními účastníky [39].

S tím patrně souvisí další zjištění, které říká, že absence značek určujících směr evakuace vedla pouze k nepatrnému zvýšení času potřebnému pro evakuaci. Značení totiž nehraje důležitou roli v případě, když je člověk o volbě trasy předem rozhodnut nebo následuje pohyb a trasu ostatních. Vliv značení se ukázal jako významný spíše v případech, kdy se jednalo o zakazovací značky – např. červené světlo [40]. Pokusy o změnu evakuační trasy pomocí navigace od jiné osoby (virtuálního agenta) ovlivnila volbu trasy, ale nikoliv volbu únikového východu [41].

V této oblasti bylo také pozorováno několik jevů, které se projevíly při zpětném zkoumání záznamů z proběhlých přírodních katastrof, případně byly pozorovány u zvířat, ale neprojevily se při cvičných evakuacích. Jednalo se například o nesymetrické využívání únikových cest (*symmetry breaking*) nebo o nelineární závislost mezi počtem osob a časem příchodu k nouzového východu (v případě cvičných evakuací byla pozorována lineární závislost).

2.5.4 Vzájemná kooperace a interakce

Na první pohled by se mohlo zdát, že při život ohrožujících situacích bude hrozit riziko sobeckého chování a sledování vlastních zájmů bez ohledu na ostatní. To by se mohlo projevit různými potyčkami či dokonce násilím, což by vedlo k výrazné proměně a znesnadnění celého evakuačního procesu. Dav by se stal nepředvídatelným a nebezpečným.

Z analýzy dostupné literatury [26] nicméně vyplývá, že pro tento typ davové paniky neexistuje přesvědčivý důkaz. V lidech převažuje pocit sounáležitosti s davem, neso-

becké chování a snaha pomáhat ostatním. Jednotlivé osoby mají tendenci spolupracovat a být solidární s ostatními účastníky. Pozorována byla rovněž snaha o vytváření samoorganizovaných front při evakuaci [42].

Pozorování a interakce s ostatními účastníky může v některých lidech navodit nutkání pozorované chování bez rozmyslu přijmout. Toto slepé následování davu závisí na konkrétních vlastnostech člověka a prostředí, obecně lze ale říci, že k němu dochází při značné míře nejistoty [43]. Při větší znalosti prostředí se tomu lidé mají tendenci spíše vyhnout [44]. Na druhou stranu malá skupina informovaných lidí dokáže vést skupinu ostatních a výrazně tím zrychlit průběh evakuace – výhodou je, pokud se tito lídři nachází jak na začátku, tak na konci skupiny [45].

2.5.5 Vliv požáru a toxických látek na zdraví člověka

Přítomnost ohně a kouře v místnosti významně ovlivňuje chování a zdraví člověka v několika aspektech. Prvním z nich je vliv tepla a snížené vlhkosti vzduchu. Ty mohou vést k přehřívání organismu, větší únavě, zvládání menší fyzické zátěže a v krajích případech i k celkovému kolapsu. Dalším je pokles hladiny kyslíku, kvůli kterému dochází ke zhoršenému dýchání.

Vůbec největším problémem, který se na poškození zdraví podílí nejvyšší měrou, je vdechování škodlivých látek obsažených v kouři. To se podle dat z amerického National Center for Health Statistics (NCHS) podílelo na zhruba 60 % všech úmrtí způsobených požárem v US mezi lety 1979 a 2007 [46]. Na základě chemického rozboru můžeme konstatovat, že k nejvíce jedovatým látkám patří oxid uhelnatý, formaldehyd, akrolein, nebo kyanovodík. Jejich konkrétní mix pak určuje druh hořlaviny.

Pro známé škodliviny existuje metodika pro určení limitů akutní toxicity (Acute Exposure Guideline Levels, AEGLs) [47] s hodnotami změřených koncentrací vedoucích k různým stupňům poškození organismu. Rozlišují se celkem tři stupně.

- AEGL-1 – při této koncentraci pocítují lidé první nepříjemné pocity a podráždění. Účinky jsou ale pouze přechodné.
- AEGL-2 – představuje koncentraci, při jejímž překročení by se mohly vyskytnout závažnější nepříznivé účinky a zhoršená schopnost úniku.
- AEGL-3 – při překročení může dojít k ohrožení zdraví a případně i smrti.

Uvádí se také hodnoty koncentrací LC_{50} , což je hodnota pro 50% úmrtnost pokusných zvířat. Postup tvorby modelů zabývajících se odhady koncentrací pro jednotlivé stupně lze najít například v práci [48].

2.6 Softwarové nástroje pro ABM a CFD

Co se týče modelování založeného na agentech, existuje opravdu velmi široká nabídka simulačních nástrojů od jednoduchých open-source knihoven pro různé programovací jazyky až po velmi komplexní specializované komerční programy. Velký přehled existujících nástrojů včetně jejich charakteristik lze nalézt v článcích [49] nebo [50]. Rozdělení je možné provést na základě licence, použitého programovacího jazyka, typu a způsobu vytváření agenta, výkonnosti nebo primární domény pro modelování.

Mezi nejznámější nástroje využívané pro potřeby modelování pohybu většího množství osob v uzavřeném prostoru včetně jejich interakce a řešení kolizí patří například AnyLogic, FlexSim, SimAgent či NetLogo.

Také u nástrojů zabývajících se simulací pohybu tekutin lze nalézt více softwarových produktů, opět s různou mírou komplexity, oblastí zaměření, komerčních nebo open-source. Tato doména je však už více specifická, o něco méně rozšířená a ve své podstatě velmi výpočetně náročná. Zatímco u modelování založeném na agentech se model skládá z mnoha malých diskrétních entit, které jsou v zásadě velmi jednoduché na popis a celková výpočetní složitost stoupá až v souvislosti s rostoucím množstvím vyrobených agentů, při simulaci pohybu tekutin je situace jiná. Vyžaduje výpočet pohybu obrovského množství částic v prostoru za použití pokročilých numerických metod.

Z tohoto důvodu tak existují mnohé komerční softwarové programy, které navíc tyto služby mohou nabízet včetně výpočetního výkonu v cloudu. Příkladem jsou nástroje Ansys Fluent nebo SimScale. Z bezplatných nástrojů pro simulaci dynamiky tekutin lze zmínit například program OpenFOAM.

Při modelování evakuace osob během požáru je pak z fluidní dynamiky využívána specifická oblast šíření ohně a kouře. Ze specializovaných softwarových nástrojů přímo pro tento účel je možné uvést komerční programy PyroSim a CYPE. Často využívanou bezplatnou alternativou je nástroj Fire Dynamics Simulator. Ten je používán i jako výpočetní engine některých placených produktů, nedisponuje však příliš pokročilou grafickou nadstavbou a editorem pro tvorbu prostředí.

3 Praktická část

Kapitola popisuje tvorbu vlastního modelu. Nejdříve bude zformulován základní návrh a podrobněji vysvětlena jeho implementace. Následně bude provedena jeho verifikace, validace a nakonec bude věnován prostor simulaci daného problému včetně analýzy výsledků.

3.1 Formulace problému a základní návrh modelu

Pro účely této práce bude vytvořen ukázkový model zabývající se problémem evakuace osob z budovy, ve které vypukl požár. Z hlediska sběru dat se jako zajímavé jeví měřit časy, ze kterých se skládá interval RSET a zdraví evakuovaných osob. Z výsledků experimentů bude možné usuzovat přiměřenost kapacity únikových cest a vhodnost architektonického návrhu prostředí. Dále pak vliv chování osob na čas strávený v hořící budově a na jejich bezpečnost.

Jak již bylo uvedeno dříve, vhodným nástrojem pro modelaci tohoto problému je spojení agentového a fluidního modelu. Následuje základní představení komponent, ze kterých se návrh modelu skládá.

3.1.1 Prostředí

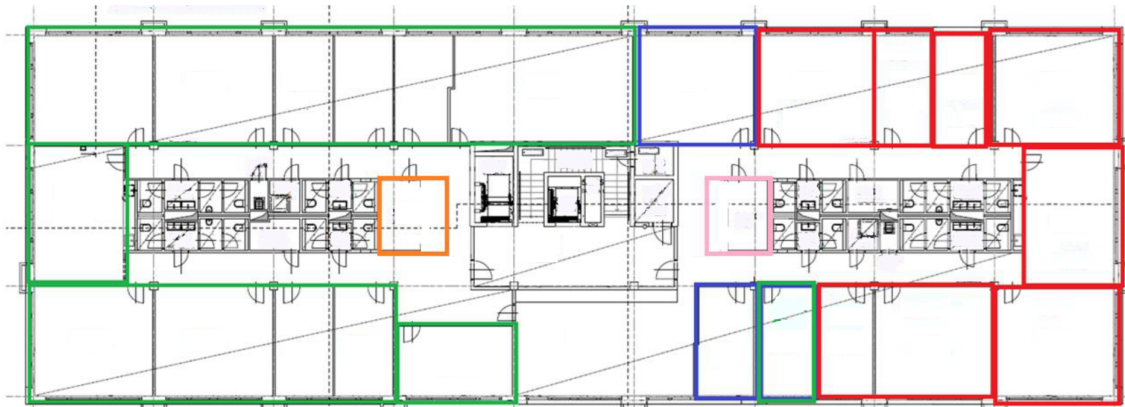
Prostředím se rozumí prostor, do kterého jsou umístěni agenti a součástí něhož budou rovněž data získaná z modelu simulujícího šíření ohně.

V modelu bude jako prostředí zvoleno jedno patro kancelářské budovy. Při výběru došlo k inspiraci existujícím objektem v Hradci Králové, takže počet místností, jejich rozměry i polohy dveří a únikových východů budou odpovídat skutečnosti.

Náčrt půdorysu patra budovy je znázorněn na obrázku 2. Nachází se na něm několik místností, které jsou navzájem odděleny stěnami a dveřmi. Pro zjednodušení se v modelu bude předpokládat, že stěny jsou kompletně ohnivzdorné a nepropouští žádné škodlivé látky. U dveří se naopak bude očekávat, že jsou kompletně otevřené a kouř i oheň skrz ně může procházet dál. Celá budova bude modelována jako uzavřená, takže se nepočítá s vlivem venkovního prostředí.

Všechny kancelářské místnosti i chodby budou vybaveny funkčními požárními detektory, které budou schopné rychle zaznamenat přítomnost požáru v místnosti (v in-

tervalu $t_{detection}$) a po uplynutí intervalu t_{alarm} spustit alarm v celé budově. Pro jednoduchost se schopnost detektorů omezí pouze na informování o požáru a nebude docházet k pokusu o jeho uhašení. Nejdůležitější číselné parametry prostředí jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 2: Plánek patra kancelářské budovy.

Tabulka 1: Parametry prostředí.

| | |
|-------------------------|------|
| Délka | 60 m |
| Šířka | 20 m |
| Výška | 3 m |
| Počet kanceláří | 23 |
| Počet únikových východů | 2 |

3.1.2 Agenti

Jde o základní stavební kámen agentové části modelu. Jeho komplexnost a také způsob vzájemné interakce nejvíce ovlivňuje realističnost výsledné simulace.

Na základě výběru prostředí se bude jednat o zaměstnance z jedné firmy, kteří sem každý den dochází do práce. Jejich rozmístění se bude soustředit primárně do jednotlivých kanceláří, přičemž každému člověku se na patře budovy přidělí vlastní místo, na kterém bude trávit větší část pracovní doby. Zároveň během dne s určitou pravděpodobností podnikne několik cest mezi kancelářemi, zúčastní se schůzek v jiných kancelářích, projde se po chodbách, půjde na oběd, na kávu nebo toaletu.

Ze zvolené charakteristiky agentů a teoretických poznatků v části 2.5 vyplývají pro implementaci následující předpokládané vzorce chování.

- Agenti budou dospělí lidé v produktivním věku (cca od 18 do 65 let). Dá se proto očekávat rychlost pohybu na úrovni průměrné rychlosti dospělého člověka bez větších odchylek, které by se musely uvažovat u dětí nebo starších imobilních osob.
- Vzhledem k věkové skladbě lze bez újmy na obecnosti očekávat podobný počáteční stav i průběh úbytku zdraví v závislosti na vdechnutých koncentracích škodlivin.
- Agenti budou mít velmi dobrou znalost prostředí, protože se v něm pohybují denně. Budou tedy nejspíš dobře znát rozmístění evakuačních východů a využívat nejkratších tras pro přesuny po budově. Nebude proto nutné příliš se zabývat vlivem evakuačních značek nebo dezorientací při hledání východu.
- Agenti se mezi sebou budou navzájem znát a běžně spolu komunikovat. Během evakuace budou schopni spolupracovat, varovat se a případně si i pomáhat.

3.1.3 Interakce agentů s prostředím

Primární interakcí mezi prostředím a agentem bude způsob změny chování při reakci na nenadálou situaci. V první fázi bude třeba popsat způsob chování od spuštění alarmu do uvědomění si nutnosti evakuace (časový interval $t_{pre-movement}$). V druhé fázi přijde na řadu samotná snaha o opuštění budovy, ze které vyplyne čas t_{travel} .

Na základě dat získaných z fluidního modelu se bude v pravidelných intervalech počítat míra expozice nebezpečnými látkami a délka pobytu v prostředí s vysokými teplotami. Tyto faktory způsobí postupné snižování míry zdraví. Dle jeho aktuální hodnoty a množství kouře v prostředí se určí rychlost, s jakou se agent dokáže pohybovat po budově. Cílem agenta bude dostat se k některému z únikových východů s dostatečnou mírou zdraví.

3.2 Použité softwarové nástroje

Ačkoliv v současné době existuje několik nástrojů, které podporují kombinaci agentového modelování a modelování dynamiky tekutin, jedná se o placené produkty ty-

picky pro komerční využití do velkých firem či výzkumných institucí. Z tohoto důvodu bylo provedeno rozhodnutí použít dva různé nástroje a výsledky jednoho z nich vzít jako součást vstupu druhého programu. Jak již bylo ukázáno na několika příkladech v části 2.4.1, je tento postup běžnou praxí v mnoha jiných pracích zabývajících se tímto tématem.

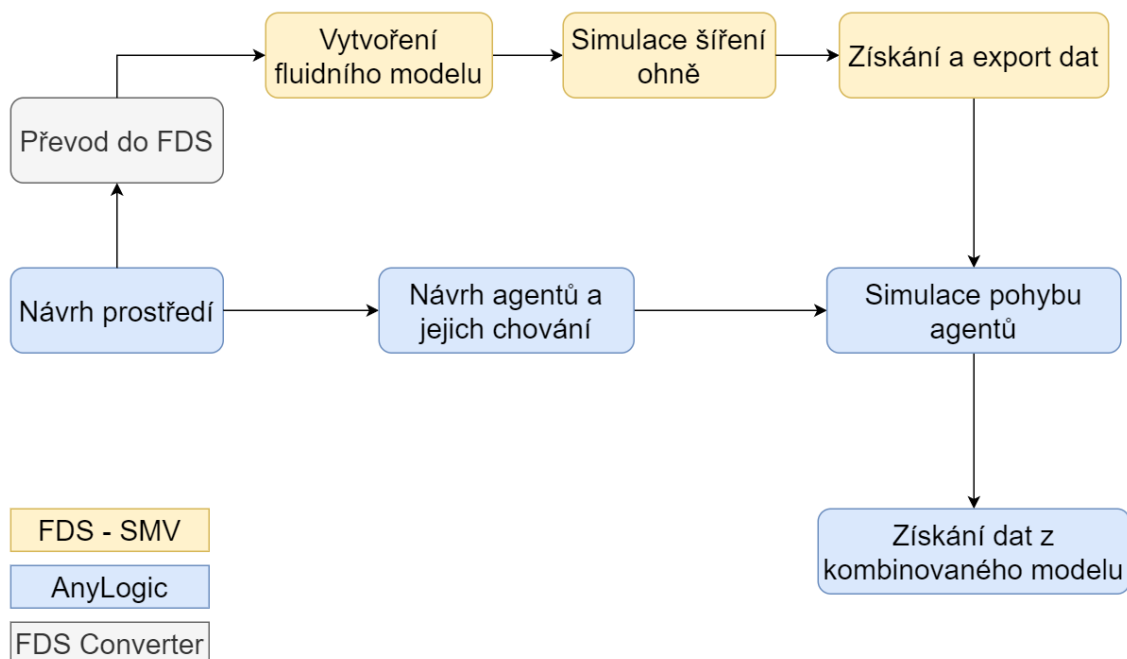
Protože primárním zkoumaným jevem je v tomto případě chování agentů, zaměřuje se práce ve vyšší míře na část s agentovým modelem, kterému bude věnován o něco větší důraz. Rovněž i na výsledky simulace bude nahlíženo z pohledu agentů. Tato skutečnost vede k tomu, aby byl jako hlavní modelovací nástroj využit AnyLogic [51]. Program nabízí pokročilé funkce pro vytváření modelů založených na agentech a je zdarma ve verzi pro nekomerční využití. K popisu modelů využívá programovací jazyk Java a také jednotliví agenti jsou implementováni jako objekty tříd tohoto široce používaného programovacího jazyka. Zároveň existuje velká škála různých tutoriálů a poměrně podrobná uživatelská dokumentace, pomáhající v pochopení a ovládání tohoto softwaru.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, AnyLogic nemá nativní podporu pro výpočty týkající se dynamiky tekutin. Je tedy nutné, aby byl pro simulaci šíření požáru použit jiný, k tomu určený software. Vybrán byl program Fire Dynamics Simulator (FDS) [52], jelikož se jedná o volně dostupný open-source nástroj, který se nejlépe hodí pro řešení problému šíření požáru. Zároveň má podporu pro ukládání a export naměřených dat, která mohou být použita jako vstup do agentového modelu. Program v sobě nabízí numerické řešení Navierových-Stokesových rovnic a je vhodný pro nízkorychlostní tepelně řízené proudění s důrazem na přenos kouře a tepla. Formulace rovnic a numerický algoritmus jsou obsaženy v technické dokumentaci k programu FDS [53]. Implementace modelů, které jsou zde využívány, prošly procesem verifikace a validace, která je rovněž popsána v dokumentaci.

Pro převod návrhu prostředí ze softwaru AnyLogic do jazyka FDS vznikla konzolová aplikace `AnylogicToFdsConverter` v jazyce C#, která je součástí elektronické přílohy této práce.

3.3 Implementace modelu

Implementace kombinovaného modelu se skládá z několika částí. Grafické znázornění kroků vedoucích k sestavení výsledného modelu je zobrazeno na obrázku 3.



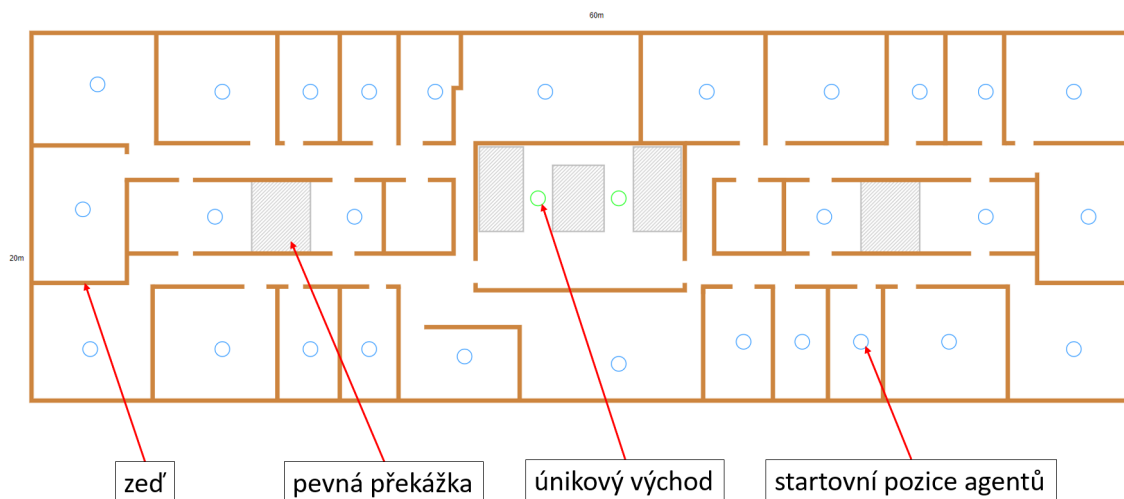
Obrázek 3: Návrh modelu.

V dalších sekcích jsou tyto části modelu představeny podrobněji včetně implementačních detailů.

3.3.1 Návrh prostředí

Prostředí bylo namodelováno dle plánu patra budovy (viz obrázek 2) v softwaru AnyLogic. Jeho rozměry jsou 1500 x 500 pixelů, takže jeden metr ve skutečnosti odpovídá 25 pixelům v modelu. Výslednou podobu lze vidět na obrázku 4.

Hnědou barvou jsou na obrázku vyznačeny zdi, které jsou pro agenty i oheň definovány jako nepropustné. Šedá barva představuje pevné neprostupné překážky, které nejsou z hlediska běžného pohybu osob důležité. Jde o různé skladové prostory, výtahy apod. Dále jsou na plánu vidět modré kružnice představující místa, na kterých se budou agenti nacházet při spuštění modelu. Kružnice je vždy jedna pro každou kancelářskou místnost a definuje počáteční obsazenost příslušné kanceláře. Zároveň slouží jako místo pro detektor požáru. V prostředí se dále nachází dvě zelené kružnice představující únikové východy.



Obrázek 4: Návrh prostředí – AnyLogic.

Jelikož v rámci simulace dochází k modelaci požáru v jednom z pater budovy, bude dále pro zjednodušení učiněn předpoklad, že dosažením únikového východu dojde k opuštění modelu agentem, čímž se z jeho pohledu dokončí proces evakuace.

Typ prostředí

AnyLogic nabízí tři různé možnosti, jak může být prostor definován. Dá se vytvořit jako spojitý, diskrétní nebo GIS (Geografický informační systém). GIS se hodí zejména pro modelování velkých reálných geografických oblastí (města, země), pro něž je významná jejich poloha na Zemi. Pro zde popisovaný model kancelářské budovy se lépe hodí použít jednoduchý souřadný systém, do kterého se umístí vybrané patro budovy.

Protože do programu budou vkládána data z fluidního modelu, který pracuje s prostorem rozděleným na jednotlivé buňky, dává větší smysl zvolit typ prostředí jako diskrétní. Zde se pozice agentů neurčuje v pixelech, ale pomocí souřadnic udávajících sloupec a řádek v diskrétní matici. Navržený model pracuje s prostředím o 300 sloupcích a 100 řádcích. To znamená, že prvek v matici (buňka) představuje oblast 5 x 5 pixelů. Největším rozdílem mezi spojitým a diskrétním prostorem z pohledu implementace je nutnost ošetření stavu, kdy by se dva agenti v jednu chvíli nacházeli na stejných souřadnicích diskrétního prostoru – to je v diskrétním modelu nepovolený chybový stav.

Z praktického hlediska se jedná o rozumné omezení, díky kterému se dá věrohodněji modelovat zahlcení evakuačních cest a celkové zpomalení pohybu osob v úzkých

hrdlech. Pokud se agent chce během simulace přesunout na již obsazenou pozici, zkusí se místo toho buď dostat na souřadnici v bezprostředním okolí (udělá krok stranou), nebo zůstane stát na místě a čeká, až jiný agent místo uvolní.

Použité datové struktury

Kromě grafické reprezentace modelu jsou důležité i jeho datové struktury, které se během simulace využívají. Přehled těch nejdůležitějších včetně stručných charakteristik uvádí tabulka 2.

Detekce požáru

Prostředí se v průběhu simulace může nacházet v některém ze dvou stavů **NORMAL** nebo **ALARM** podle toho, byl-li v prostředí zaznamenán požár. Detekce se provádí pomocí požárních hlásičů, které zachycují množství kouře a v případě překročení kritické hranice vydají signál pro spuštění alarmu. Umístění požárních detektorů je shodné s rozmístěním startovních vrcholů pro agenty.

Detektory jsou implementované tak, aby zareagovaly ve chvíli, kdy se viditelnost prostředí vlivem kouře sníží o 50 %. Zda je tato podmínka splněna se kontroluje během simulace každou jednu sekundu. V případě, že je snížení na některém z detektorů zaznamenáno, dojde po uplynutí časového intervalu pěti sekund ke spuštění alarmu (tzn. $t_{alarm} = 5$).

Inicializace

Po spuštění simulace v softwaru AnyLogic dojde k vykreslení grafické podoby prostředí. Dále je také nutné ještě před spuštěním simulace naplnit hodnoty datových struktur z tabulky 2. Za tímto účelem je definována událost `initializeEnvironment`, která se vykoná právě jednou, a to na samém počátku běhu simulace v čase 0. Primárním úkolem události je vytvoření nové instance třídy `Environment` a její naplnění údaji na základě hodnot uvedených v kolekcích `listOfWalls` a `listOfCubes`. Dále proběhne přidání agentů do modelu a uložení jejich aktuální polohy. Následně je možné začít se simulací pohybu agentů.

Tabulka 2: Datové struktury prostředí v programu AnyLogic.

| Název | Datový typ | Využití |
|---------------------------------|---|--|
| <code>listOfWalls</code> | <code>ArrayList<Wall></code> | Kolekce zdí použitých v modelu |
| <code>listOfCubes</code> | <code>ArrayList<RectangularWall></code> | Kolekce překážek použitých v modelu |
| <code>evacuationsPoints</code> | <code>ArrayList<PointNode></code> | Množina cílových vrcholů (evakuačních východů) pro agenty |
| <code>officePoints</code> | <code>ArrayList<PointNode></code> | Množina startovních vrcholů pro agenty |
| <code>fdsDataProvider</code> | <code>FdsDataProvider</code> | Instance třídy obstarávající data naměřená ze simulace požáru |
| <code>environment</code> | <code>OfficeEnvironment</code> | Objekt obsahující aktuální informace o polohách agentů, překážek a stavu prostředí |
| <code>officeAgents</code> | <code>ArrayList<OfficeAgent></code> | Kolekce agentů pohybujících se v modelu |
| <code>evacuationDataList</code> | <code>ArrayList<EvacuationData></code> | Záznamy o časech jednotlivých agentů z průběhu evakuace |

3.3.2 Převod do FDS

Prostředí navržené v programu AnyLogic je potřeba popsat i pro FDS, aby do něj bylo možné umístit zdroj požáru a spustit simulaci jeho šíření v čase. Model se v programu AnyLogic ukládá do souboru s příponou `.alp`, jehož syntaxe odpovídá

běžnému xml souboru. Vstupem pro FDS je soubor s příponou .fds obsahující definice komponent, ze kterých se model skládá.

Pro ilustraci je níže uveden příklad definice rovné zdi v programu AnyLogic. Kód popisuje komponentu typu Wall. Jsou zde definovány jednotlivé vlastnosti komponenty (např. unikátní identifikátor, uživatelsky měnitelné jméno, barva, atd.) a jejich hodnoty.

```
<Wall>
  <Id>1686420964879</Id>
  <Name><![CDATA[wall1]]></Name>
  <X>225</X><Y>60</Y>
  <Label><X>10</X><Y>0</Y></Label>
  <PublicFlag>>true</PublicFlag>
  <PresentationFlag>>true</PresentationFlag>
  <ShowLabel>>false</ShowLabel>
  <DrawMode>SHAPE_DRAW_2D3D</DrawMode>
  <Z>0</Z>
  <LineColor>-3308225</LineColor>
  <LineWidth>6</LineWidth>
  <LineMaterial>null</LineMaterial>
  <FillingType>HATCHED_AREA</FillingType>
  <ZHeight>20</ZHeight>
  <Closed>>false</Closed>
  <Points>
    <Point><X>0</X><Y>0</Y><Z>0</Z></Point>
    <Point><X>15</X><Y>0</Y><Z>0</Z></Point>
    <Point><X>0</X><Y>25</Y><Z>0</Z></Point>
    <Point><X>0</X><Y>150</Y><Z>0</Z></Point>
    <Point><X>0</X><Y>125</Y><Z>0</Z></Point>
    <Point><X>0</X><Y>150</Y><Z>0</Z></Point>
  </Points>
</Wall>
```

Aby zůstaly zachovány stejné rozměry a velikosti objektů namodelované pro AnyLogic, byla implementována konzolová aplikace pro převod zdí, pevných překážek a umístění zdroje požáru z jednoho modelu do druhého. Program AnylogicToFdsConverter

na vstupu očekává cestu k souboru s příponou .alp a jeho výstupem je textový soubor obsahující definice jednotlivých komponent použitelných pro FDS.

Pro přenos do syntaxe používané programem FDS je důležitá jednak souřadnice počátečního bodu X a Y , jednak množina bodů `Points`. Zde jsou v relativních souřadnicích uvedené další body, ze kterých se zeď skládá. První bod má vždy souřadnice $(0, 0)$, dále je pak zajímavý každý třetí řádek se souřadnicí následujícího bodu (předchozí dva definují případné zakřivení).

Převodník vygeneruje předpis pro stejný objekt (zeď) do souboru s příponou .fds, jehož podoba vypadá následovně.

```
&OBST ID = 'wall1_0', XB=7.0,7.0,21.0,15.0,0.0,3.0,  
RGB=160,82,45, SURF_ID='INERT'/'
```

Vygenerovaný kód představuje příkaz k vytvoření objektu typu `OBST` (překážka) s identifikátorem `wall1_0`. Ten koresponduje se jménem `AnyLogic` komponenty, navíc ale dochází k přidání postfixu, jelikož komponenta typu `Wall` se může skládat z více bodů tvořících lomenou čáru. V souboru pro FDS se překážky definují pomocí souřadnic kvádrů, kterým je vyplněn prostor, takže lomená čára tvořená $n + 1$ body se musí rozdělit na n různých objektů typu `OBST`.

V ukázkovém příkladu dojde k vytvoření objektu, který má nulovou šířku (v prostoru x -ové souřadnice zabírá prostor od 7.0 do 7.0), délku šest metrů (na ose y se nachází v rozmezí od 21.0 do 15.0) a výšku tři metry (od 0.0 do 3.0 na ose z). Jelikož zde probíhá převod souřadnic z dvourozměrného modelu do třírozměrného, byla hodnota v ose z definována explicitně tak, aby vyplnila celý prostor v dané souřadnici.

Dále je potřeba při převodu zajistit úpravu souřadnic a dodržet předem zvolené měřítko. Z ukázkového kódu si je možné povšimnout, že souřadné systémy obou programů mají rozdílně definovaný směr růstu hodnoty na ose y . Co se týče měřítka, odpovídá v programu `AnyLogic` jeden metr 25 bodům (pixelům), v FDS připadá na jeden metr skutečného prostoru jedna jednotka v souřadném systému programu.

3.3.3 Vytvoření fluidního modelu

Model popisující šíření požáru se skládá z několika částí, které jsou níže popsány vždy nejprve slovně a poté i s přidanou ukázkou zápisu ze zdrojového kódu pro FDS.

- Jméno modelu – definuje název modelu, pod kterým lze spustit výpočet. Spuštění je možné z příkazové řádky pomocí `fds {Jméno modelu}.fds`.

```
&HEAD CHID='OfficeModel' /
```

- Doba simulace – definuje čas, ve kterém dojde k ukončení simulace (v sekundách). Začátek je vždy stanoven v čase $t = 0$, jedná se tedy zároveň o údaj specifikující celkovou dobu běhu.

```
&TIME T_END=1800.0 /
```

- Počáteční teplota v místnosti – teplota před vznikem požáru ($^{\circ}\text{C}$).

```
&MISC TMPA=22.0 /
```

- Počet kroků – kolikrát během doby simulace budou sesbírána a uložena data pro agentový model. Označíme-li dobu simulace t a celkový počet kroků n , pak data z kroku k , kde $k \in \langle 0, n - 1 \rangle$ vyjadřují stav modelu v čase $\frac{k}{n-1} * t$.

```
&DUMP NFRAMES=1800 /
```

- Velikost mřížky – definuje rozměry a počet částí, na které bude v jednotlivých dimenzích prostor rozdělen – výpočet všech parametrů pro šířící se kapalinu bude počítán pro každou buňku mřížky. Číslování probíhá od nuly, níže tedy vidíme definici mřížky o velikosti 120 x 40 x 6 buněk. Dále jsou uvedeny rozměry prostoru, který má mřížka vyplnit. V tomto případě se jedná o prostor 60 x 20 x 3.

```
&MESH ID='MESH', IJK=119,39,6, XB=0.0,60.0,0.0,20.0,0.0,3.0 /
```

- Umístění zdroje požáru – označuje místo vzniku požáru a jeho velikost.

```
&OBST ID='BURNER_SOURCE', XB=1.0,2.5,1.5,3.0,0.0,0.5, SURF_ID='INERT' /  
&VENT ID='BURNER_VENT', XB=1.0,2.5,1.5,3.0,0.5,0.5, SURF_ID='BURNER' /
```

- Hořící látka – označení a vzorec chemické sloučeniny figurující jako hořící látka.

```
&SPEC ID = 'PVC', FORMULA = 'C2H3Cl' /
```

- Sloučeniny figurující v chemické reakci – v modelu se nachází definice vzduchu (AIR) a vznikajících sloučenin (PRODUCTS) včetně jejich objemových podílů.

```
&SPEC ID='AIR', BACKGROUND=T
      SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=1.5975,
      SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=5.76 /
```

```
&SPEC ID='PRODUCTS',
      SPEC_ID(1)='HYDROGEN CHLORIDE', VOLUME_FRACTION(1)=1.0,
      SPEC_ID(2)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(2)=0.955,
      SPEC_ID(3)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(3)=0.14,
      SPEC_ID(4)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(4)=1.05,
      SPEC_ID(5)='SOOT', VOLUME_FRACTION(5)=0.9,
      SPEC_ID(6)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(6)=5.76 /
```

- Parametry chemické reakce – zde se definují fyzikální a chemické vlastnosti požáru jako je množství uvolněného tepla, druh hořící látky a popis chemické reakce. V příkladu uvedeném níže dochází k hoření vzduchu a vinylchloridu za vzniku sloučenin definovaných v proměnné PRODUCTS. Definice chemické reakce je převzata z příkladu v uživatelské dokumentaci k programu FDS [53].

```
&REAC FUEL='PVC', HEAT_OF_COMBUSTION=16400, SPEC_ID_NU='PVC', 'AIR',
      'PRODUCTS', NU=-1,-1,1, CHECK_ATOM_BALANCE=.TRUE. /
&SURF ID='BURNER', COLOR='RED', HRRPUA=832 /
```

- Slices pro sběr dat – definice souřadnic roviny v prostoru, ze které se sbírají hodnoty sledovaných veličin. Ty jsou použity na vstupu v agentovém modelu. Ukládají se data o teplotě, relativní vlhkosti, viditelnosti (vzhledem ke koncentraci kouře) a koncentracích oxidu uhelnatého a chlorovodíku.

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=1.5/
&SLCF QUANTITY='RELATIVE HUMIDITY', PBZ=1.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=1.5/
&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION' SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', PBZ=1.5/
&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION' SPEC_ID='HYDROGEN CHLORIDE', PBZ=1.5/
```

- Popis prostředí – definice zdí, překážek, dveří a oken v modelu. Níže je uveden příklad jedné z nich, celkově jich model obsahuje 86.

```
&OBST ID ='wall1_0', XB=7.0,7.0,21.0,15.0,0.0,3.0,
      RGB=160,82,45, SURF_ID='INERT' /
```

Pro větší přehlednost uvádí tabulka 3 souhrn nejdůležitějších parametrů fluidního modelu.

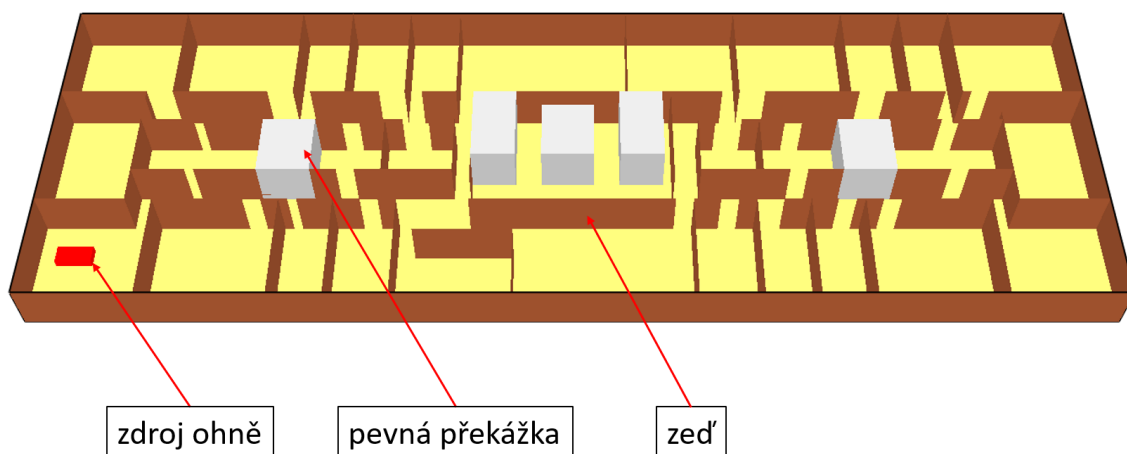
Tabulka 3: Parametry modelu dynamiky tekutin.

| | |
|---------------------------|---|
| Doba simulace | 30 minut |
| Počáteční teplota | 22 °C |
| Rozměry mřížky | 120 x 40 x 6 (celkem 28800 buněk) |
| Hořící látka | C_2H_3Cl |
| Chemická reakce | $C_2H_3Cl + 1,5975O_2 + 5,76N_2 \rightarrow$ $HCl + 0,955H_2O + 0,14CO + 1,05CO_2 + 0,9C_{0,9}H_{0,1} + 5,76N_2$ |
| Spalné teplo | 16400 kJ/kg |
| Množství uvolněné energie | 832 kW/m^2 |
| Plocha požáru | 1,92 m^2 |
| Měřené veličiny | Teplota, relativní vlhkost, viditelnost, objemová koncentrace oxidu uhelnatého, objemová koncentrace chlorovodíku |

Vzhled vytvořeného prostředí v programu Smokeview, který koresponduje s návrhem definovaným v programu AnyLogic je vidět na obrázku 5.

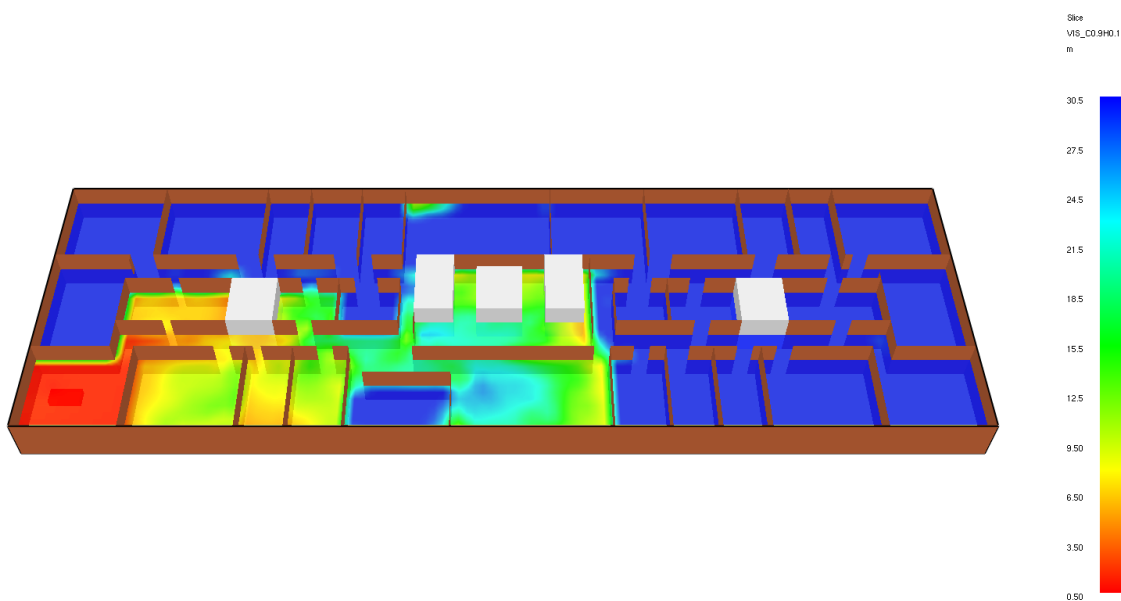
3.3.4 Simulace šíření ohně

Vytvořené prostředí, které bylo převedeno do formátu vyžadovaného programem FDS a doplněno o dodatečné informace vztahující se k modelu dynamiky tekutin se nyní použije pro simulaci šíření požáru. Během ní jsou v pravidelných intervalech ukládána data o aktuálních hodnotách naměřených veličin. Už za běhu programu se dá



Obrázek 5: Návrh prostředí v programu Smokeview.

celá simulace vizualizovat pomocí aplikace Smokeview. Zde je možné vidět šíření ohně a dalších látek v průběhu času a také si zobrazit všechny uživatelsky nadefinované roviny (slices), které slouží jako podklad pro agentový model. Ukázkou ze simulace šíření kouře v programu Smokeview zachycuje obrázek 6.



Obrázek 6: Ukázka ze simulace v programu Smokeview.

3.3.5 Získání a export dat

Program FDS ukládá vybraná data z nadefinovaných rovin do samostatných binárních souborů. Pro čtení a vizualizaci hodnot z uložených dat jsou k dispozici skripty,

kteře se nachází společně se zdrojovými kódy programu ve volně přístupném repozitáři na platformě GitHub [52]. Jednoduchou úpravou těchto skriptů lze získat nástroj, který dokáže nashromážděná data převést do n -rozměrného pole. V případě dat se sbíraných pomocí roviny (slice) vznikne trojrozměrné pole. Jeho první dvě souřadnice určují pozici buňky v rovině a třetí souřadnice určuje čas. Na souřadnicích $[i, j, k]$ se tedy nachází hodnota sledované veličiny v buňce na pozici i, j v časovém okamžiku k .

Přenos dat do programu AnyLogic se děje skrz soubor, ve kterém jsou uloženy hodnoty z pole. Zvolený formát souboru je následující. Na začátku jsou na samostatných řádcích zapsána tři čísla (x, y, z) udávající rozměry pole. Na dalších řádcích následuje výpis konkrétních hodnot. Ukládání probíhá v pořadí: $[0, 0, 0]$, $[0, 0, 1]$, ..., $[0, 0, z - 1]$, $[0, 1, 0]$, ..., $[0, 1, z - 1]$, $[0, 2, 0]$, ..., $[0, y - 1, z - 1]$, $[1, 0, 0]$, ..., $[x - 1, y - 1, z - 2]$, $[x - 1, y - 1, z - 1]$. V tabulce 4 je uveden seznam jmen souborů s popisem dat, který skript vytvoří.

Tabulka 4: Exportované soubory načítané po spuštění programu AnyLogic.

| Název souboru | Obsah souboru |
|--|--|
| <code>temperature.txt</code> | Hodnoty naměřených teplot (°C) |
| <code>carbon monoxide volume fraction.txt</code> | Koncentrace oxidu uhelnatého (ppm) |
| <code>hydrogen chloride volume fraction.txt</code> | Hodnoty koncentrace chlorovodíku (ppm) |
| <code>visibility.txt</code> | Viditelnost na základě množství kouře ve vzduchu (m) |
| <code>relative humidity.txt</code> | Relativní vlhkost vzduchu (%) |

3.3.6 Návrh agentů a jejich chování

Agent je v modelu reprezentován jako instance třídy `OfficeAgent`. Pro jeho vytvoření jsou potřebné tři parametry.

- `agentId` – jednoznačný identifikátor agenta – v modelu se agenti číslovají přirozenými čísly od 1 do n .

- `homeNodeId` – identifikátor jedné ze startovních pozic v prostředí. Po spuštění simulace se agent objeví na souřadnicích určených touto pozicí.
- `scenarioNumber` – číslo scénáře, do kterého agent patří. Tato informace se využívá pouze k nastavení experimentů, kde je potřeba pracovat s různým počtem agentů.

Uvedené parametry jsou do modelu načteny během inicializace prostředí z externího souboru `AgentsDefinition.xlsx`.

Použité datové struktury

Kromě vstupních parametrů využívá agent další vlastní datové struktury. Stručný přehled těch nejdůležitějších uvádí tabulka 5.

Tabulka 5: Datové struktury agenta v programu AnyLogic.

| Název | Datový typ | Využití |
|--------------------------------|--------------------------------|---|
| <code>plannedActivity</code> | <code>OfficeActivity</code> | Plánovaná nebo aktuálně prováděná aktivita |
| <code>state</code> | <code>AgentState</code> | Interní stav |
| <code>maxVirtualSpeed</code> | <code>int</code> | Maximální možná rychlost v modelu |
| <code>behaviourProvider</code> | <code>BehaviourProvider</code> | Instance třídy pro získání konkrétní implementace typu chování |
| <code>healthCalculator</code> | <code>HealthCalculator</code> | Objekt pro výpočet aktuálního zdraví |
| <code>warnThreshold</code> | <code>int</code> | Počet varování, které agenta přesouvají do stavu <code>SEE_FIRE</code> |
| <code>ignoreAlarmAtAll</code> | <code>boolean</code> | Zda agent ignoruje alarm v prostředí |
| <code>alarmReactionTime</code> | <code>int</code> | Doba reakce na spuštěný alarm (pokud <code>ignoreAlarmAtAll == false</code>) |

Inicializace

Po vytvoření nového agenta proběhne pomocí metody `setupAgent()` nastavení výchozích hodnot vybraných datových struktur. Některé z nich se nastavují náhodně,

aby byly hodnoty pro různé agenty rozdílné. Jejich přehled včetně metodiky výpočtu zachycuje tabulka 6.

Tabulka 6: Nastavení náhodných proměnných.

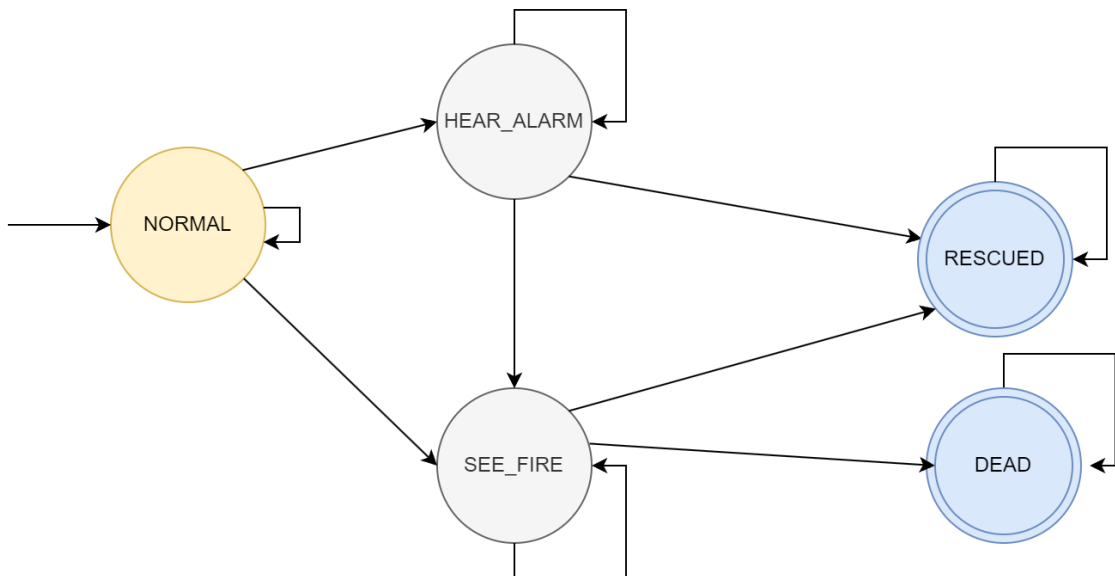
| Název | Počáteční hodnota |
|--------------------------------|---|
| <code>maxVirtualSpeed</code> | Náhodné číslo z rovnoměrného rozdělení v intervalu $\langle 0, 25 \rangle + 75$ |
| <code>warnThreshold</code> | Náhodné číslo n z intervalu $\langle 1, 5 \rangle$, kde $n = k$ s pravděpodobností $\frac{1}{2^{k-1}}$ pro $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ a $\frac{1}{16}$ pro $k = 5$ |
| <code>ignoreAlarmAtAll</code> | Hodnota <code>true</code> s pravděpodobností 10 % |
| <code>alarmReactionTime</code> | Náhodné číslo z normálního rozdělení $N(50, 25)$ v intervalu $\langle 5, 100 \rangle$ (v sekundách) |

Stavy agenta

Každý agent se během své existence vždy nachází v právě jednom z následujících interních stavů `AgentState` (názvy odpovídají označení, které je použito v modelu).

- `NORMAL` – počáteční stav. Odpovídá běžnému stavu, kdy agent vykonává standardní činnost a dosud nezaregistroval žádné nebezpečí ani přítomnost požáru.
- `HEAR_ALARM` – v tomto stavu se nachází ve chvíli, kdy zaregistruje a vnímá zvuk alarmu z prostředí. Agent přejde do stavu `HEAR_ALARM` ve chvíli, kdy od spuštění alarmu uplyne doba `alarmReactionTime`, a zároveň platí, že `ignoreAlarmAtAll` je nastaven na `false`.
- `SEE_FIRE` – stav popisuje situaci, ve které si je agent vědom toho, že v prostředí nastal požár a je potřeba začít se evakuovat. Přechod do stavu nastane v okamžiku, kdy agent zpozoruje přítomnost ohně či kouře v prostředí nebo je varován alespoň k jinými agenty, kde $k \geq \text{warnThreshold}$.
- `DEAD` – do tohoto stavu agent přechází ve chvíli, kdy klesne míra jeho zdraví na nulu. Jde o jeden ze dvou možných koncových stavů.
- `RESCUED` – druhý koncový stav, kterého je dosaženo ve chvíli, kdy agent dorazí na místo únikového východu.

Možnosti přechodů mezi stavy lze popsat konečným automatem znázorněným na obrázku 7. Žlutou barvou je označen počáteční stav, koncové stavy jsou vybarveny modře.



Obrázek 7: Možnosti přechodu mezi interními stavy agenta.

Typy chování a prováděné aktivity

Na základě interního stavu si agent vybírá příslušné chování. Pro koncové stavy není žádný popis chování potřeba, využije se proto prázdná implementace `NoneBehaviour`. Zajímavější jsou nekoncové stavy, pro které model implementuje celkem tři druhy chování – `NormalBehaviour` (pro stav `NORMAL`), `AlarmBehaviour` (pro stav `HEAR_ALARM`) a `FireBehaviour` (pro stav `SEE_FIRE`). Konkrétní implementace je vybrána pomocí instance třídy `BehaviourProvider`. Pro každý typ chování existuje seznam aktivit typu `OfficeActivity`, které může agent provádět. Ten vznikl na základě poznatků z řešení provedené v teoretické části práce. Přehled je uveden v tabulce 7.

Tabulka 7: Seznam aktivit pro jednotlivé typy chování.

| Chování agenta | Seznam dostupných aktivit |
|------------------------------|---|
| <code>NormalBehaviour</code> | <code>WORK_IN_OFFICE</code> , <code>SHORT_VISIT</code> , <code>LONG_VISIT</code> |
| <code>AlarmBehaviour</code> | <code>FINDING_INFO</code> , <code>EVACUATION_PREPARE</code> , <code>EVACUATE</code> |
| <code>FireBehaviour</code> | <code>WARN_OTHERS</code> , <code>EVACUATION_PREPARE</code> , <code>EVACUATE</code> |

Níže následuje popis jednotlivých aktivit. Zvolené pravděpodobnosti přechodů mezi jednotlivými aktivitami v rámci jednoho typu chování agenta uvádí tabulky 8, 9 a 10.

- **WORK_IN_OFFICE** – aktivita simuluje běžnou práci v kanceláři. Během ní je agent přítomen na své startovní pozici (místě s identifikátorem `homeNodeId`). Doba trvání v minutách se řídí náhodnou veličinou z normálního rozdělení $N(30, 15)$.
- **SHORT_VISIT** – krátká návštěva jedné z ostatních místností. Zahrnuje v sobě cestu z jednoho místa na druhé a krátký pobyt v cílové kanceláři. Délka trvání návštěvy v minutách je zvolena dle hodnoty náhodného čísla z normálního rozdělení $N(5, \frac{5}{2})$.
- **LONG_VISIT** – delší návštěva jedné z ostatních kanceláří. Skládá se z cesty a pobytu v cílovém místě, jehož doba v minutách se řídí náhodnou veličinou s normálním rozdělením $N(20, 10)$.
- **FINDING_INFO** – aktivita simulující získávání informací na základě zaznamenání zvuku alarmu. Její náplní je návštěva náhodných míst v budově s krátkou dobou pobytu (jedná se vlastně o náhodnou procházku).
- **EVACUATION_PREPARE** – tato činnost má za úkol simulovat přípravu na evakuaci. Probíhá tak, že se agent vrací z aktuálního místa do své kanceláře, zde věnuje krátkou dobu sbalení osobních věcí (čas v minutách je vybrána náhodně z rozdělení $N(2, 1)$) a následně se začne věnovat aktivitě **EVACUATE**.
- **EVACUATE** – simuluje cestu agenta k jednomu z únikových východů. Kromě přechodu na základě pravděpodobnosti začne agent vykonávat tuto aktivitu také v případě, kdy jeho zdraví poklesne pod hodnotu 70.
- **WARN_OTHERS** – v rámci této aktivity se agent, který si je vědom vzniklého nebezpečí, snaží upozornit ostatní a varovat je před vzniklým požárem. V případě, že narazí ve své blízkosti na jiné agenty, informuje je o požáru a o nutnosti evakuace. Na druhé straně pro varovaného agenta pak na základě tohoto podnětu může dojít k přechodu do stavu **SEE_FIRE**. Jak totiž vyplývá z teoretických poznatků, bývá varování ostatních nejsilnějším argumentem pro evakuaci hned po očitě zkušenosti.

Tabulka 8: Matice přechodu mezi jednotlivými aktivitami pro NormalBehaviour.

| | NONE | WORK_IN_OFFICE | SHORT_VISIT | LONG_VISIT |
|----------------|------|----------------|-------------|------------|
| NONE | 0 | 0,6 | 0,2 | 0,2 |
| WORK_IN_OFFICE | 0 | 0,5 | 0,2 | 0,3 |
| SHORT_VISIT | 0 | 0,8 | 0,1 | 0,1 |
| LONG_VISIT | 0 | 0,8 | 0,15 | 0,05 |

Tabulka 9: Matice přechodu mezi jednotlivými aktivitami pro AlarmBehaviour.

| | NONE | FINDING_INFO | EVACUATION_PREPARE | EVACUATE |
|--------------------|------|--------------|--------------------|----------|
| NONE | 0 | 0,5 | 0,25 | 0,25 |
| FINDING_INFO | 0 | 0,5 | 0,25 | 0,25 |
| EVACUATION_PREPARE | 0 | 0 | 0 | 1 |
| EVACUATE | 0 | 0 | 0 | 1 |

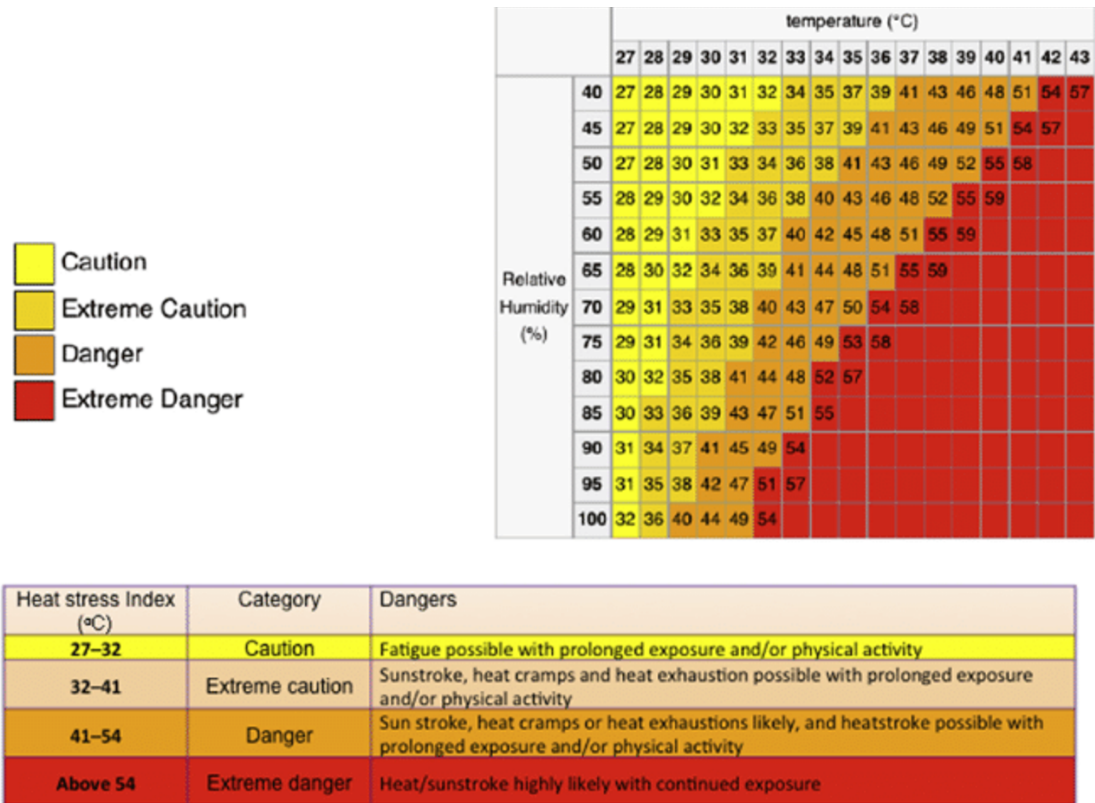
Tabulka 10: Matice přechodu mezi jednotlivými aktivitami pro FireBehaviour.

| | NONE | WARN_OTHERS | EVACUATION_PREPARE | EVACUATE |
|--------------------|------|-------------|--------------------|----------|
| NONE | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,6 |
| WARN_OTHERS | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,6 |
| EVACUATION_PREPARE | 0 | 0 | 0 | 1 |
| EVACUATE | 0 | 0 | 0 | 1 |

Výpočet zdraví

Důležitou součástí modelu je sledování ukazatele zdraví jednotlivých agentů a jeho změny v důsledku působení požáru. Výpočet hodnoty zdraví se provádí po každém kroku simulace pomocí instance třídy `HealthCalculator`. V počátečním stavu je hodnota zdraví agenta nastavena na hodnotu 100. Na základě poznatků z teoretické části je dále modelován úbytek zdraví v důsledku působení vysokých teplot a množství vdechnutých škodlivin obsažených v kouři.

Co se týče vlivu teploty, používá program výpočet tepelného indexu, což je funkce kombinující teplotu vzduchu a relativní vlhkost. Tyto údaje jsou v každém časovém úseku dostupné ze simulace v programu FDS. Na základě hodnoty indexu je možné klasifikovat míru nebezpečí pro člověka. Tabulku s hodnotami, tak jak ji definuje National Weather Service (NWS) zachycuje obrázek 8.



Obrázek 8: Tabulka teplotního indexu (zdroj obrázku [1]).

Pro výpočet konkrétní hodnoty *heatIndex* pro teplotu vzduchu t a relativní vlhkost h je využit vzorec dle metodiky NWS [54]:

$$\begin{aligned}
 \text{heatIndex} = & -42,379 + 2,04901523 * t + 10,14333127 * h \\
 & - 0,22475541 * t * h - 0,00683783 * t^2 - 0,05481717 * h^2 \\
 & + 0,00122874 * t^2 * h + 0,00085282 * t * h^2 - 0,00000199 * t^2 * h^2.
 \end{aligned}$$

Konstanty použité ve vzorci jsou určeny pro teplotu ve stupních Fahrenheita. V modelu je uchována informace, jaké množství času už strávil agent v kategorii *extreme caution*, *danger* a *extreme danger*.

Kromě teploty má na zdraví agenta rovněž vliv množství vdechnutých částic jedovatých plynů. Zde jsou sledovány koncentrace oxidu uhelnatého a chlorovodíku. Opět je

pro zjednodušení použita škála tří kategorií podle nebezpečnosti na základě metodiky AEGLs [55], [56]. Konkrétně se pracuje s limity AEGL-2 pro čas 30 minut (*extreme caution*), AEGL-3 pro čas 30 minut (*danger*) a AEGL-3 pro čas 10 minut (*extreme danger*). Aktuální hodnota zdraví agenta a v čase t , je v modelu definována pomocí vzorce:

$$h_a(t) = 100 - t_{\text{extreme_caution}} * \frac{2}{1000} - t_{\text{danger}} * \frac{7}{1000} - t_{\text{extreme_danger}} * \frac{2}{100}, \quad (3)$$

kde t_n je množství časových úseků strávených v kategorii n . V modelu se pracuje s úsekem o délce 125 milisekund.

Číselné konstanty ve vzorci byly zvoleny tak, aby mohly přibližně reflektovat skutečné limity. K poklesu hodnoty na nulu by proto mělo například dojít přibližně po čase, kdy je agent vystaven působení jedné ze škodlivých látek v koncentraci AEGL-3. Ta v kategorii *danger* odpovídá času 30 minut. V tomto případě tedy 30 minut znamená $30 * 60 * 8 = 14400$ časových úseků. Potom $h_a(t) = 100 - 14400 * \frac{7}{1000} = -0,8$.

Nicméně je třeba si uvědomit, že hodnotu zdraví musíme chápat jako abstraktní a zjednodušující vyjádření velmi složitého stavu a pocitu v reálném životě. Dá se říci, že číslo 100 udává stav, ve kterém agent prakticky nebyl zasažen vlivy požáru. Naopak číslo 0 znamená fatální poškození s rizikem úmrtí. Hodnota mezi těmito dvěma extrémy pak udává větší či menší míru zásahu, která ale v reálném světě zpravidla nemá lineární průběh a není z ní například možné odvozovat trvalé následky, či pravděpodobnost přežití v delším časovém horizontu. Stejně tak je zjednodušující i zvolená metodika, jelikož nebere do úvahy další potenciálně nebezpečné plyny nebo koncentraci kyslíku. V praxi lze také krátkodobě určitému množství vdechnutých škodlivin zabránit zadržením dechu nebo pohybem při zemi, kde je koncentrace kouře nižší.

3.3.7 Simulace pohybu agentů

Vytvoření agenti z předchozí sekce jsou rozmístěni do prostředí a začíná jejich pohyb po budově. Simulace je diskrétní a probíhá po jednotlivých krocích. V rámci každého kroku jsou na agentovi zavolány dvě metody: `beforeStep()` a `onStep()`.

V metodě `beforeStep()` dojde k aktualizaci interního stavu agenta na základě podnětů z prostředí. Podle stavu se pak zavolá funkce `beforeStep()` na příslušné implementaci chování. Obecně je cílem zjistit, jakou aktivitu agent aktuálně vykonává.

Pokud u něj žádná aktivita neprobíhá, je na základě předem definovaných pravděpodobností pro daný typ chování vybrána aktivita nová. Pro aktivitu se zvolí cílová poloha a nalezne nejkratší cesta od aktuální pozice agenta do cíle. Pro nalezení cesty je použit algoritmus A^* .

Dále zde dochází pomocí třídy `DefaultMovingProvider` k výpočtu rychlosti r konkrétního agenta podle vzorce 2, který počítá rychlost na základě viditelnosti v prostředí. Číslo r_{normal} je pro každého agenta definováno dle vzorce:

$$r_{normal} = \frac{8}{5} * \frac{\text{maxVirtualSpeed}}{100}. \quad (4)$$

Metoda `onStep()` simuluje vždy jeden krok na cestě k cílovému vrcholu pro vykonání aktivity. Tento krok probíhá v modelu každých 125 milisekund. Jelikož je navržené prostředí diskrétní a rozdělené do jednotlivých buněk, může se každý z agentů v jednom kroku simulace posunout vždy do jedné ze sousedních buněk v rámci své cesty. Při pohybu právě o jednu buňku v každém kroku simulace se dá dosáhnout maximální rychlosti 8 buněk za sekundu, což na základě měřítka odpovídá reálné rychlosti $\frac{8}{5} m/s$. Aby bylo možné modelovat různé rychlosti jednotlivých agentů, dojde na základě hodnoty r_{normal} , předpokládané rychlosti při snížené viditelnosti r a zdraví h k výpočtu rychlostního koeficientu k pomocí vzorce:

$$k = \frac{2}{3} * \frac{r}{r_{normal}} + \frac{1}{3} * \frac{r}{r_{normal}} * \frac{h}{100}. \quad (5)$$

Tento koeficient tvoří dvě složky. První vyjadřuje podíl rychlosti za aktuálních podmínek vůči ideálnímu stavu (s váhou $\frac{2}{3}$). Druhá složka pak ještě tento podíl násobí podílem zdraví (s váhou $\frac{1}{3}$). V praxi bude hodnota $k * \frac{\text{maxVirtualSpeed}}{100}$ určovat pravděpodobnost, s jakou agent v rámci metody `onStep()` provede posun do některé ze sousedních buněk. Koeficient byl zvolen empiricky takovým způsobem, aby zohledňoval jak vliv kouře, tak aktuální zdravotní stav při výpočtu rychlosti pohybu. Za normálních podmínek a při plném zdraví je $k = 1$, takže k pohybu dojde v průměru při `maxVirtualSpeed` krocích ze 100. To odpovídá reálné rychlosti r_{normal} . S rostoucím šířením požáru a jeho vlivem na prostředí i agenty pak bude odpovídajícím způsobem klesat až k hodnotám blízcím se nule.

Zároveň platí, že k přesunu agenta na sousední buňku dojde pouze ve chvíli, nejsou-li buňky v jeho okolí obsazené ostatními agenty. V případě, kdy se agent nikam nepohybuje a věnuje se některé z aktivit, čeká se v tomto kroku pouze na její ukončení.

3.3.8 Získání dat z kombinovaného modelu

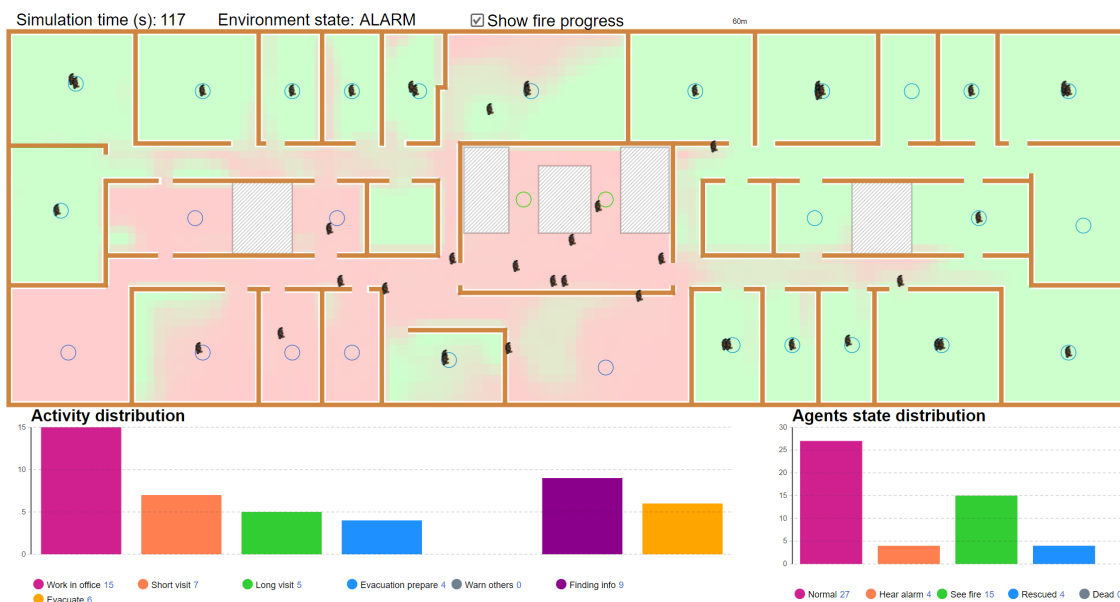
V průběhu simulace jsou v grafickém okně programu AnyLogic dostupné následující údaje.

- Aktuální čas v modelu.
- Stav prostředí.
- Četnosti prováděných aktivit jednotlivých agentů.
- Četnosti interních stavů jednotlivých agentů.

Vzhled grafického okna s informacemi uvedenými v seznamu výše je znázorněn na obrázku 9. Po skončení simulace jsou pak uloženy tyto údaje (v závorce je uveden název, pod jakým bude daný údaj zaznamenán v tabulkách a grafech).

- Doba od vzniku požáru po započetí aktivity **EVACUATE**. Odpovídá časovému intervalu $t_{pre-movement}$ (*reakční doba*).
- Doba trvání aktivity **EVACUATE**. Jedná se o úsek t_{travel} , za který se agent dostane z aktuálního místa k evakuačnímu východu (*čistý čas evakuace*).
- Celkový čas strávený v hořící budově (*RSET*). Jde o časový úsek od začátku požáru po čas, kdy se poslední agent dostane do koncového stavu.
- Kolik procent z celkového počtu agentů dosáhlo nouzového východu a bezpečně opustilo budovu. Jedná se o agenty, kteří se nachází v koncovém stavu **RESCUED** (*úspěšnost evakuace*).
- Množství zbývajících zdraví při opuštění budovy ve stavu **RESCUED** nebo 0 v případě přechodu do stavu **DEAD** (*zdraví*).

Data potřebná k výpočtům výše uvedených hodnot sbírají a ukládají jednotliví agenti v průběhu simulace pomocí třídy `EvacuationData`. Při přechodu agenta do jednoho z jeho koncových stavů proběhne předání nasbíraných dat do modelu a jejich export do výstupních souborů. Pro každou simulaci dojde k vytvoření celkem pěti souborů, z nichž každý bude obsahovat data o jedné z veličin.



Obrázek 9: Grafické okno z průběhu simulace.

3.4 Verifikace a validace modelu

Proces verifikace představeného modelu by měl ověřit, zda se výsledná implementace neodchýlila od původního záměru a model dělá to, co má. Počátečním cílem byl návrh vlastního modelu kombinujícího pohyb agentů v kancelářské budově s šířením požáru. Toho bylo dosaženo vytvořením modelu navrženém v softwaru AnyLogic, který na svém vstupu obohatil prostředí o informace týkající se šíření ohně z programu FDS. Díky tomu je možné sledovat jednak evakuační časy agentů, jednak změny chování a zdraví v závislosti na šířícím se ohni a rostoucí koncentraci škodlivin v ovzduší.

Validace zajišťuje kontrolu toho, nakolik se implementovaný model odchýlil od reality, kterou si kladl za cíl popisovat a zda je pro popisovaný problém vhodný. Pro model prostředí byl vybrán reálný kancelářský objekt, včetně rozmístění jednotlivých místností a evakuačních východů. Měl by proto odpovídat standardům požární ochrany a výsledky simulace by v tomto kontextu měly dávat smysl. Chování agentů bylo modelováno na základě charakteristik popsanych v odborné literatuře na toto téma. Implementované poznatky vychází z výsledků reálných experimentů i analýzy skutečných požárů. Šíření ohně a dalších škodlivých látek bylo prováděno specializovaným softwarem z oblasti fluidní dynamiky.

Ačkoliv na několika místech dochází k nutnému zjednodušení (popis chování agentů, propustnosti jednotlivých materiálů a jejich odolnost vůči ohni, počítání hodnoty zdraví v závislosti na expozici škodlivinami), měl by model poskytovat relevantní data.

3.5 Experimenty

Doposud se práce věnovala nejprve teoretickému a posléze i praktickému návrhu řešení, které v sobě zkombinovalo agentový model s modelem dynamiky tekutin. Verifikace a validace potvrdila aplikovatelnost modelu pro zkoumaný jev. Nyní je možné začít s jeho pozorováním. Cílem experimentů je získání dříve stanovených údajů a vyzkoušení různých konfigurací, které mohou v prostředí reálně nastat. Dále pak na základě výsledků odvodit použitelnost evakuačních plánů, limitů prostředí a zaznamenat některé zajímavé prvky v chování agentů.

Tato část se bude věnovat návrhu různých scénářů a zkoumání jejich praktických dopadů na evakuující se agenty. Při simulacích je nutné zohlednit vliv více faktorů, které mají dopad na výslednou hodnotu sledovaných veličin. Následuje výběr a bližší specifikace několika parametrů, které se zdají být při návrhu experimentů zajímavé pro další výzkum.

- Počet agentů – s rostoucím počtem agentů by mohlo potenciálně hrozit riziko zahlcení evakuačních cest a menší plynulost pohybu. Cílem bude zjistit, zda jsou kapacity evakuačních cest dimenzovány i pro plnou obsazenost zkoumaných prostor.
- Ohnisko požáru – místo, ve kterém požár vznikne, může mít vliv na dostupnost evakuačních tras, informovanost agentů v budově a jejich zdraví.
- Vlastnosti požáru – různá velikost, rychlost šíření či chemické a fyzikální vlastnosti výrazně ovlivňují množství uvolněných škodlivin i teplotu v prostředí. Výsledné nastavení určuje, jak správně reagovat a jak rychle je nutné se evakuovat.
- Detekce požáru – při vzniku požáru se předpokládá, že je v prostředí instalován funkční alarm, jehož senzory jsou v dostatečné míře rozmístěny po budově a na základě kouře v místnosti dokáží rychle zachytit vzniklý požár. Pomocí simulace se dá ale také prověřit, jaký vliv by měla situace, ve které by z nějakého důvodu došlo k poruše takového systému.

- Chování – největší neznámou je bezpochyby způsob reakce jednotlivých osob na vzniklý požár. Při implementaci agentů bylo představeno několik strategií chování a seznam možných aktivit, které mohou být vykonávány. Nastavení konkrétních pravděpodobnostních přechodů mezi jednotlivými stavy a aktivitami je opět velmi obtížně teoreticky předpověditelné. Stejně tak i rychlost reakce, informování ostatních nebo vnímání zvuku alarmu. Proto dává smysl vyzkoušet různá nastavení a zhodnotit jejich vliv na průběh celé evakuace.

Všechny experimenty budou prováděny v softwaru AnyLogic, který má ve svém nastavení podporu několika typů experimentů (**Experiment**) pro různé simulační úlohy. Ukázkový model obsahuje celkem tři varianty implementace třídy **Experiment**.

- **SimulationDefault** – ukázkový běh simulace v reálném čase s podporou grafického uživatelského rozhraní, ve kterém je možné sledovat chování jednotlivých agentů přímo za běhu simulace.
- **SimulationVirtualTime** – běh simulace v co nejrychlejším čase v prostředí s grafickým uživatelským rozhraním.
- **SimulationExperiments** – simulace bez grafického uživatelského rozhraní s možností automatického spuštění ve zrychleném čase s různým nastavením vstupních parametrů. Právě tato implementace slouží k získávání výsledků prezentovaných v této části. Pro každý ze simulovaných scénářů budou do výsledků uváděny průměrné hodnoty z 50 běhů simulace. Soubor obsahující tato data je vytvořen vždy po skončení běhu všech simulací v experimentu.

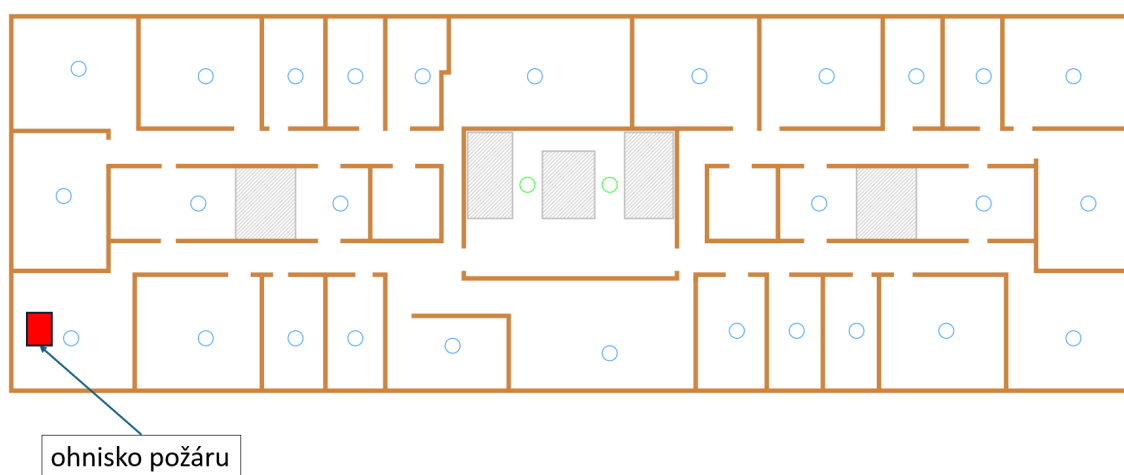
Není-li dále uvedeno jinak, používají se v experimentech hodnoty parametrů a nastavení z tabulky 11.

3.5.1 Referenční hodnoty

Tento experiment v sobě zahrnuje spuštění simulace s výchozími hodnotami uvedenými v tabulce 11 a slouží pro porovnání s dále prováděnými experimenty. Údaje o sledovaných časech evakuace a zdraví jsou zaznamenány v tabulce 12. Kromě hodnot v tabulkách lze na tomto místě zmínit odhad času $t_{detection}$, který se pohyboval v rámci nižších jednotek sekund.

Tabulka 11: Výchozí hodnoty parametrů experimentů.

| | |
|--------------------------------|---|
| Počet agentů | 50 |
| Ohnisko požáru | Lokace zobrazená na obrázku 10 |
| Čas vzniku požáru | 120 minut po startu simulace |
| Intenzita požáru, složení ohně | Hoření PVC, jehož chemická reakce a další vlastnosti jsou popsány v tabulce 3 |
| Detekce požáru | Funkční detektory reagující na přítomnost kouře |
| Chování agenta | Viz tabulky 6, 8, 9 a 10 |



Obrázek 10: Umístění ohniska požáru.

Z naměřených hodnot vyplývá, že průměrný čistý čas evakuace je relativně krátký, takže počty a rozmístění evakuačních východů se jeví jako dostatečné. Průměrná reakční doba vychází na zhruba dvě a čtvrt minuty, což je způsobeno zejména snahou nejprve požár spatřit a teprve poté začít s evakuací. I v tomto případě pak ještě vzniká potřeba vrátit se pro své osobní věci nebo varovat ostatní účastníky. To má za následek další drobné zdržení. Z hodnoty RSET lze vyčíst, že poslední z agentů opouští budovu průměrně po šesti a půl minutách.

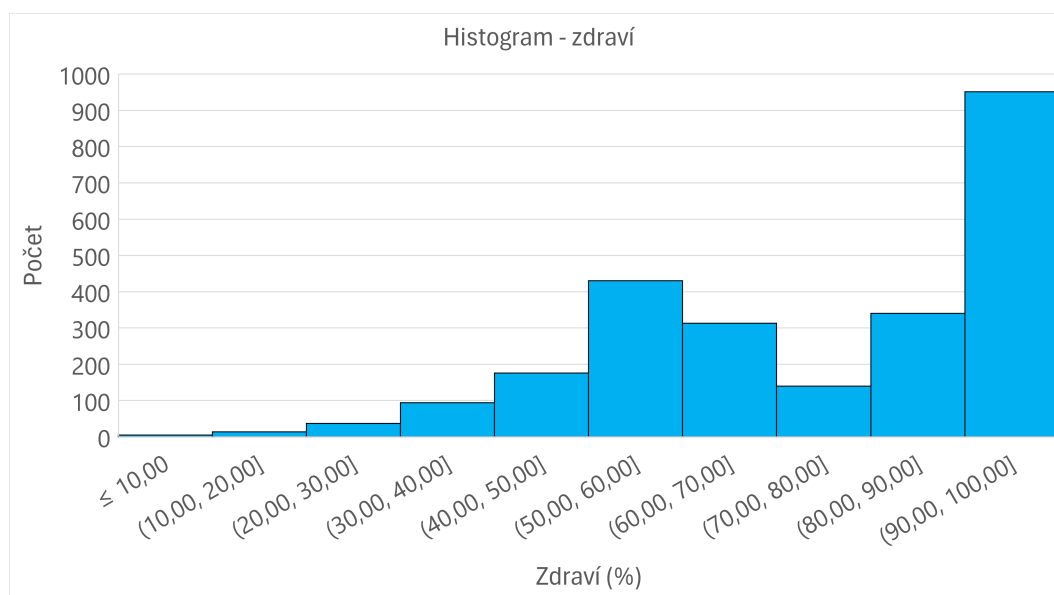
Pro daný počet agentů se zdá být garantována možnost bezpečného opuštění budovy pro případ středně velkého požáru, který byl pro tuto simulaci namodelován. Množství nadýchaných škodlivin a poškození způsobené teplem na druhou stranu není zanedbatelné (v průměru kleslo téměř o čtvrtinu). Při pohledu z druhé strany lze kon-

Tabulka 12: Referenční hodnoty simulace.

| | |
|--------------------|---------|
| Čistý čas evakuace | 47,5 s |
| Reakční doba | 132 s |
| RSET | 392,2 s |
| Zdraví | 75,2 % |
| Úspěšnost evakuace | 100 % |

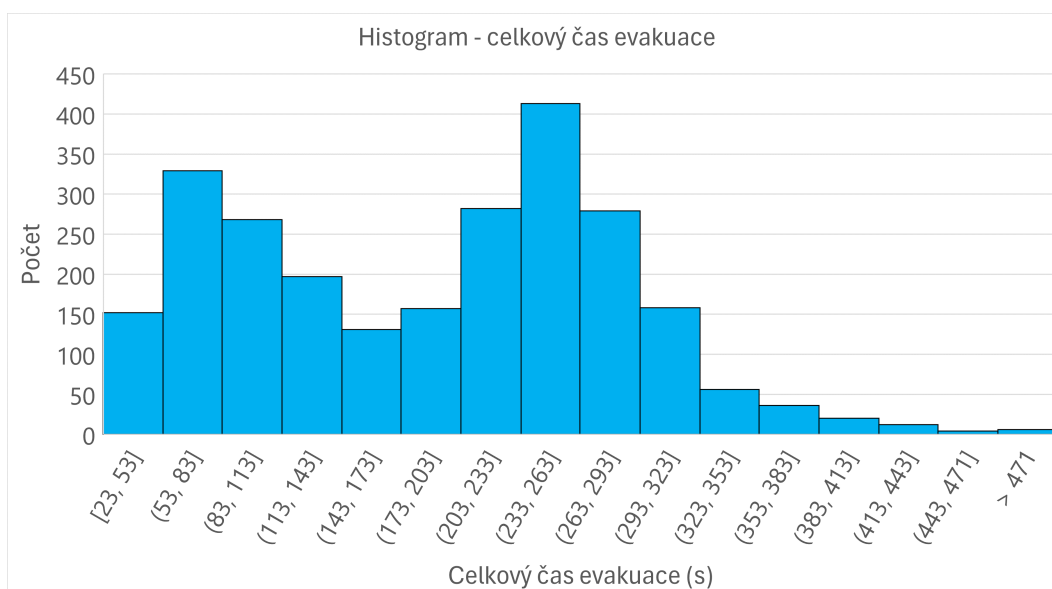
statovat, že v případě, kdy se bude chování reálných lidí blížit popisu aktivit a jejich pravděpodobnostem uvedeným v experimentu, mají takto jednající lidé velkou šanci na záchranu v případě popsaného typu nebezpečí.

Kromě průměrných hodnot jsou ještě pro zajímavost na obrázcích 11 a 12 uvedeny histogramy s rozložením zdraví a celkové doby evakuace (doba, kterou strávil agent v budově od začátku požáru). Jedná se o data naměřená u jednotlivých agentů ze všech 50 simulací v rámci experimentu, celkem je tedy v každém histogramu 2500 záznamů.



Obrázek 11: Histogram pro zdraví jednotlivých agentů.

U kategorie zdraví spadá největší počet agentů do rozmezí 90 až 100, je zde ale rovněž vidět početná skupina v intervalu 50 až 60. Od této hodnoty směrem dolů už zastoupení prudce klesá. Pro celkový čas evakuace platí, že hodnoty jsou nejčastěji v



Obrázek 12: Histogram pro celkový čas evakuace jednotlivých agentů.

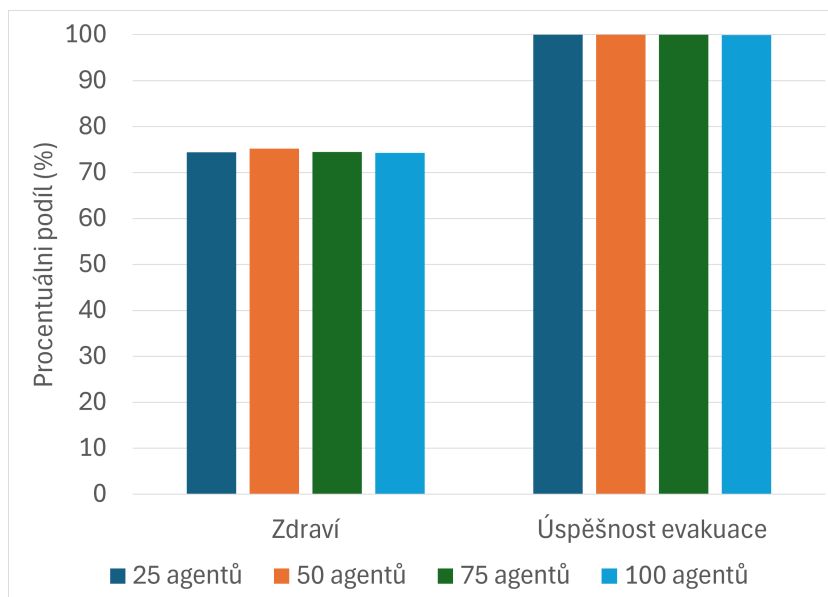
rozmezí od 233 do 263 a od 53 do 83. Okolo těchto intervalů pak počty postupně klesají, takže by se agenti dali z určitého pohledu rozdělit na menší skupinku rychlejších agentů se středem okolo hodnoty 68 a větší skupinu pomalejších agentů se středem 248.

3.5.2 Vliv počtu agentů

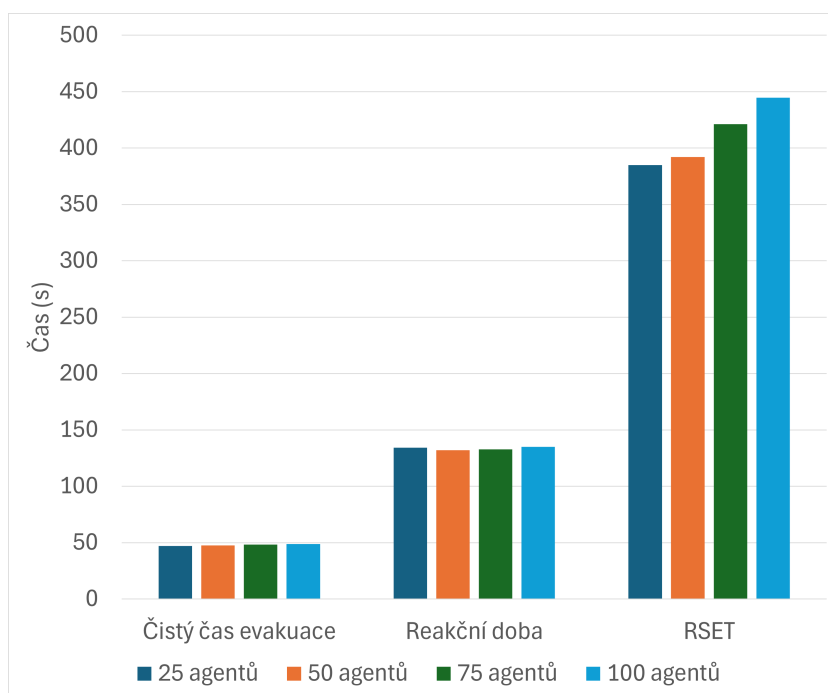
Vybrané prostředí má za běžného provozu obsazenost přibližně 50 osob. Nicméně maximální kapacita je o něco vyšší a správný evakuační plán by měl být připraven i na tento scénář. Proto byl proveden experiment zkoumající různé počty agentů a jejich vliv na časy evakuace. Souhrn uvádí tabulka 13 a grafické srovnání zachycují grafy na obrázcích 13 a 14.

Tabulka 13: Vliv počtu agentů.

| Počet agentů | 25 | 75 | 100 |
|--------------------|---------|---------|---------|
| Čistý čas evakuace | 47 s | 48,3 s | 48,8 s |
| Reakční doba | 134,2 s | 132,7 s | 134,9 s |
| RSET | 384,8 s | 421,3 s | 444,6 s |
| Zdraví | 74,4 % | 74,5 % | 74,3 % |
| Úspěšnost evakuace | 100 % | 100 % | 99,9 % |



Obrázek 13: Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti pro jednotlivé počty agentů.



Obrázek 14: Časy evakuace pro jednotlivé počty agentů.

Naměřené hodnoty ukazují, že ani dvojnásobné navýšení počtu agentů nezpůsobuje zahlcení evakuačních cest, protože průměrný čistý čas evakuace zůstává ve všech případech přibližně stejný. Průměrná reakční doba je také pro různé počty agentů podobná.

Postupné navýšení lze vidět u intervalu RSET, což je patrně způsobeno vlivem chování agentů. S větším počtem osob se totiž v modelu zvyšují počty agentů ignorujících

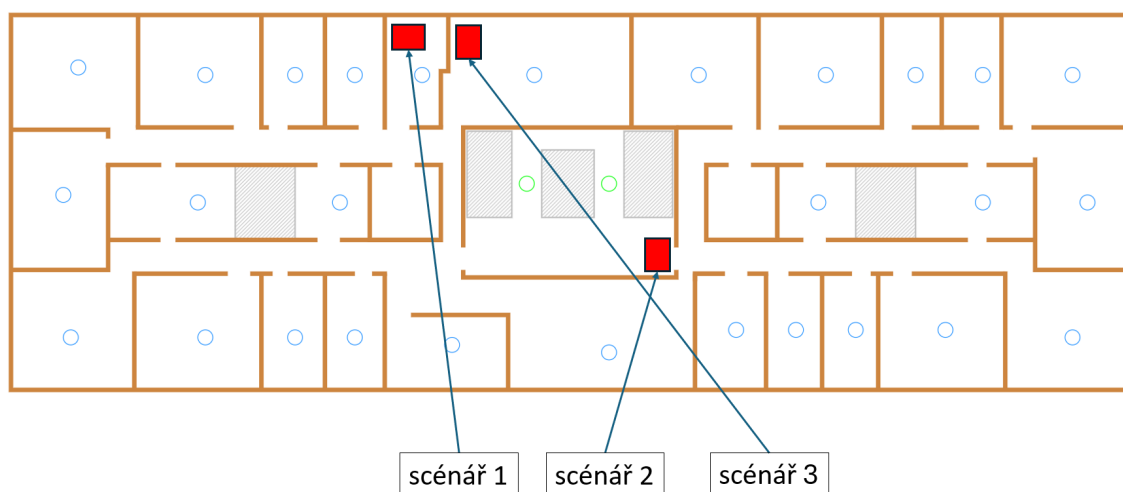
cích alarm, zvětšuje se rozptyl rychlostí pohybu i reakcí na alarm. Existuje proto větší míra pravděpodobnosti, že se některý z agentů nachází v místě, kde se o požáru dozví později.

Zvyšování času RSET se rovněž negativně nepropsalo ani do průměrného úbytku zdraví. To indikuje, že agenti s dlouhým časem opuštění budovy byli nejspíš ti, kteří se nacházeli v odlehlých místech budovy daleko od zdroje požáru.

Ve scénáři se 100 agenty dvakrát nastala situace, ve které se jeden agent nestihl evakuovat včas. Vzhledem k průměrnému ukazateli zdraví to nicméně nevypadá, že by se jednalo o problém způsobený nastavením prostředí, nebo množstvím agentů. Příčinou byl nejspíš souběh několika „nešťastných náhod“ způsobených velkým počtem opakování. Při 50 opakováních se 100 agenty se jednalo o 5000 jednotlivých pokusů o evakuaci, z nichž dva skončily neúspěšně.

3.5.3 Umístění ohniska požáru

Dalším sledovaným parametrem, který má vliv na způsob a průběh evakuace, je místo výskytu požáru. V rámci tohoto experimentu byla vybrána tři další ohniska a změřen vliv jejich umístění na celkové časy, zdraví a úspěšnost evakuace. Vybraná místa pro zdroj požáru lze vidět na obrázku 15.

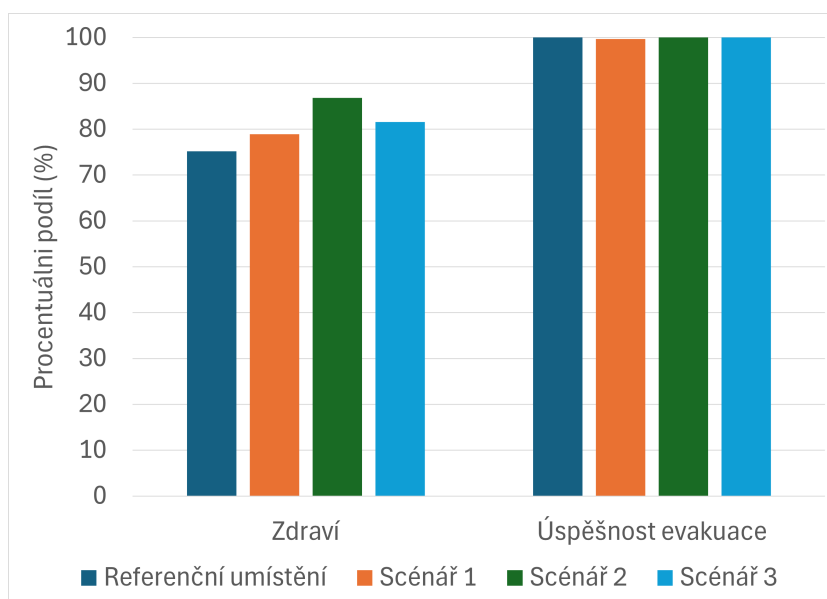


Obrázek 15: Rozmístění zdrojů požáru pro jednotlivé scénáře.

Naměřené hodnoty z příslušných scénářů uvádí tabulka 14. Grafické porovnání všech umístění shrnují grafy na obrázcích 17 a 16.

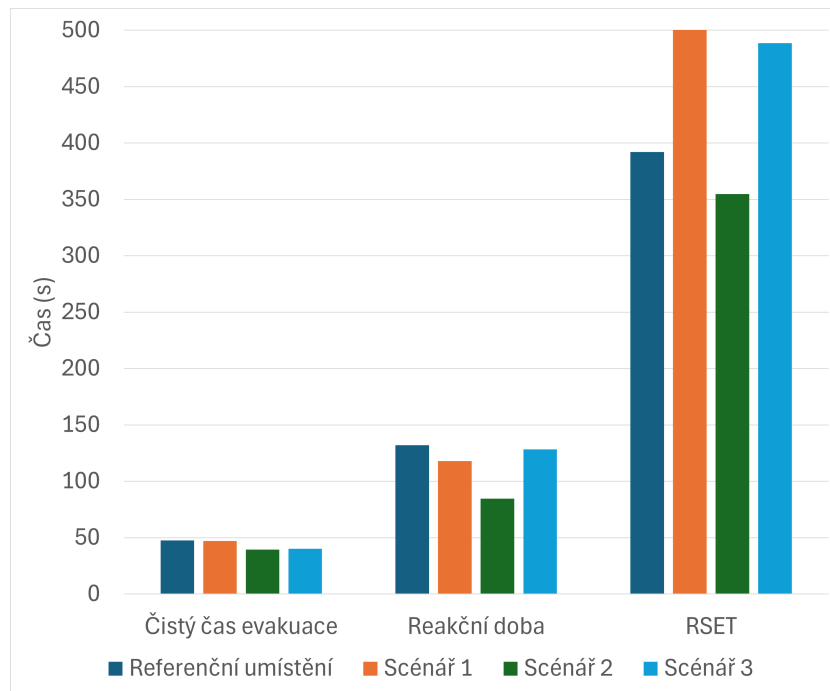
Tabulka 14: Různá umístění ohniska požáru

| | Scénář 1 | Scénář 2 | Scénář 3 |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Čistý čas evakuace | 47,1 s | 39,4 s | 40,1 s |
| Reakční doba | 118 s | 84,6 s | 128,4 s |
| RSET | 506,9 s | 354,7 s | 488,6 s |
| Zdraví | 78,9 % | 86,8 % | 81,6 % |
| Úspěšnost evakuace | 99,7 % | 100 % | 100 % |



Obrázek 16: Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti pro jednotlivá ohniska požárů.

Data získaná z různých umístění se v některých ohledech poměrně liší. V prvním scénáři, který zkoumá vznik požáru v menší místnosti pro jednoho agenta dokonce v několika simulacích došlo k tomu, že se malá část agentů nestihla evakuovat. Z hlubší analýzy výsledků vyplynulo, že problém zapříčinil dlouhý čistý čas evakuace, který byl více než trojnásobný oproti průměru. Jednalo se o agenty, kteří měli nastavenou rychlost `maxVirtualSpeed` na úrovni dolní hranice, a zároveň se rozhodli pro evakuaci v místě, které se nacházelo daleko od evakuačních východů. Kvůli vyšší reakční době se oheň stihl dostatečně rozšířit, takže během evakuace docházelo k dalšímu zpomalení šířícím se kouřem a následně i vdechnutými zplodinami.



Obrázek 17: Časy evakuace pro jednotlivá ohniska požárů.

Druhý scénář modeloval vznik požáru v otevřeném prostoru v blízkosti evakuačních východů. Předpokládáno bylo jeho rychlejší šíření, navíc se zdrojem v místě, kudy musí projít většina agentů. To dává agentům menší čas na bezpečné opuštění budovy. Tentokrát byla úspěšnost 100 %, ale významně poklesly všechny tři sledované časové ukazatele. Kratší průměrná reakční doba byla zřejmě způsobena snazším zpozorováním nebezpečí ze strany agentů. Zajímavý je rovněž pokles u čistého času evakuace. Tento jev pramení z umístění ohniska požáru poblíž evakuačního východu. Agenti se totiž pro evakuaci často rozhodují právě v případě, kdy se dostanou do přímého kontaktu s požárem, takže dosažení východu už jim netrvalo takovou dobu.

Ze snížení obou dříve zmíněných časů plyne i nižší čas RSET a díky méně času stráveném v prostředí se zvýšilo i průměrné zdraví při ukončení evakuace. Scénář tedy zachycuje do jisté míry paradoxní situaci, kde nastavení podmínek, které potenciálně snižovalo velikost intervalu ASET, vedlo průměrně k rychlejší a bezpečnější evakuaci.

Ve třetím scénáři je požár založen v jedné z větších kanceláří ve střední vzdálenosti od evakuačních východů. Průměrný čistý čas evakuace se oproti referenčním hodnotě snížil, reakční doba zůstala podobná. Výrazně se prodloužil interval RSET a průměrný zůstatek zdraví narostl zhruba o 10 %. Díky většímu prostoru místnosti zřejmě trvalo více času, než se požár začal šířit do společných prostor. Únikové trasy proto zůstaly

bezpečnější po delší dobu, takže i pozdější evakuace stále znamenala nižší vystavení se zplodinám.

Z porovnání všech čtyř lokací je vidět, že čím se ohnisko nachází dále od východu, tím víc se prodlužuje průměrný čistý čas evakuace (agenti se často rozhodují pro evakuaci právě poblíž tohoto místa). To má i negativní vliv na celkové zdraví, protože agenti, kteří zareagují rychle, stihnou projít většinu své cesty bez zasažení ohněm a jeho nebezpečnými látkami.

3.5.4 Vlastnosti požáru

Experiment popisuje dva scénáře. V prvním z nich je modelováno šíření více rozsáhlého a více ničujícího požáru (*větší požár*). Ve druhém se naopak jedná o požár menšího rozsahu (*menší požár*). Rozdílné hodnoty oproti tabulce 3 jsou popsány v tabulkách 15 a 16.

Zajímavý by mohl být rovněž i vliv různých hořlavých látek. Nicméně vzhledem ke zjednodušujícímu předpokladu, který se zaměřuje jen na nejnebezpečnější látky v kouři by neměl až tak velkou váhu v porovnání například s velikostí nebo množstvím uvolněné energie.

Tabulka 15: Změněné parametry pro větší požár.

| | |
|---------------------------|---------------|
| Spalné teplo | 17000 kJ/kg |
| Množství uvolněné energie | 1400 kW/m^2 |
| Plocha požáru | 3,2 m^2 |

Tabulka 16: Změněné parametry pro menší požár.

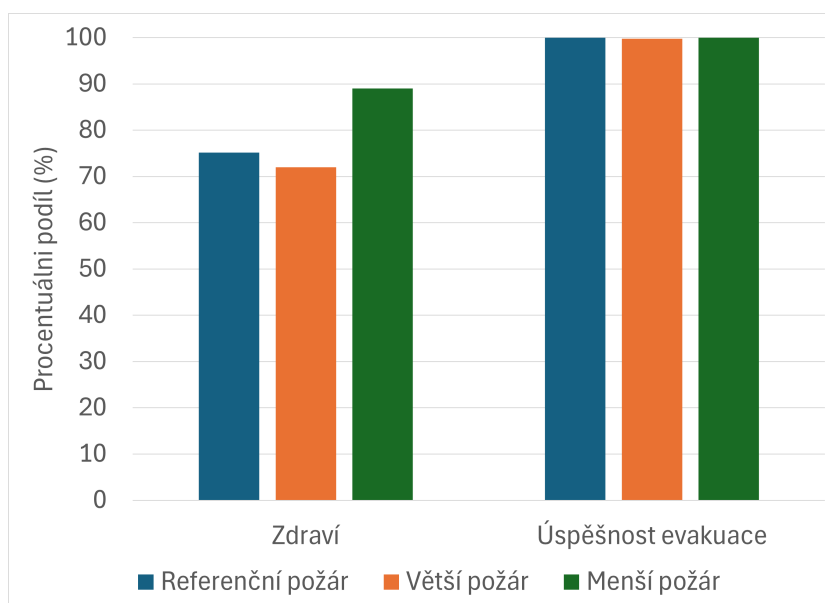
| | |
|---------------------------|---------------|
| Spalné teplo | 10000 kJ/kg |
| Množství uvolněné energie | 500 kW/m^2 |
| Plocha požáru | 0,48 m^2 |

Výsledky experimentu uvádí tabulka 17. Grafické srovnání s referenčními údaji shrnují obrázky s grafy 18 a 19.

Je vidět, že menší požár nepředstavuje pro agenty v prostředí tak velkou hrozbu. Čistý čas evakuace je krátký, zejména z důvodu větší viditelnosti v prostředí s men-

Tabulka 17: Naměřené hodnoty při různých vlastnostech požáru.

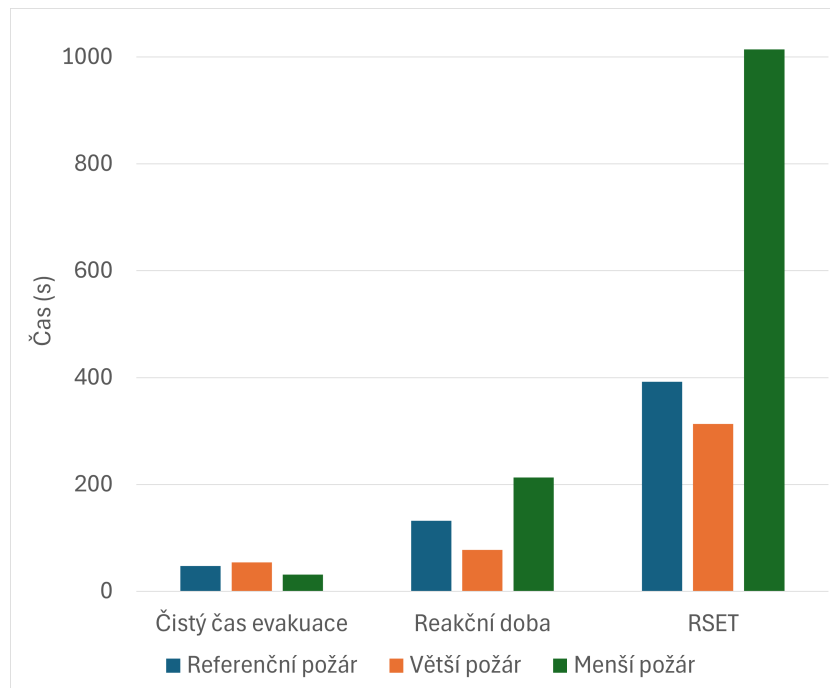
| | Větší požár | Menší požár |
|--------------------|-------------|-------------|
| Čistý čas evakuace | 54,2 s | 31,2 s |
| Reakční doba | 77,3 s | 213,1 s |
| RSET | 313,1 s | 1014,5 s |
| Zdraví | 72 % | 89 % |
| Úspěšnost evakuace | 99,8 % | 100 % |



Obrázek 18: Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti při různých vlastnostech požáru.

ším množstvím kouře. Agenti se tak mohou pohybovat rychleji. S menší nebezpečností souvisí i delší reakční doba. Ve většině případů lze dokončit přípravu k evakuaci v podobě návratu do kanceláře. Poslední agent opouští budovu průměrně po více než 16 minutách, což je skoro třikrát déle než tomu bylo u středně velkého požáru v 3.5.1. Průměrný pokles zdraví je přesto pouze okolo 10 %.

V případě většího požáru se rychlost šíření i nebezpečnost zvyšuje, takže výrazně klesá reakční doba. Naopak čistý čas evakuace o něco narostl kvůli pomalejšímu pohybu v důsledku větší koncentrace kouře. Interval RSET je o 20 % nižší. Větší požár měl rovněž negativní vliv na průměrné dosažené zdraví při dosažení evakuačního východu. V některých případech pak evakuace nebyla dokončena včas.



Obrázek 19: Časy evakuace při různých vlastnostech požáru.

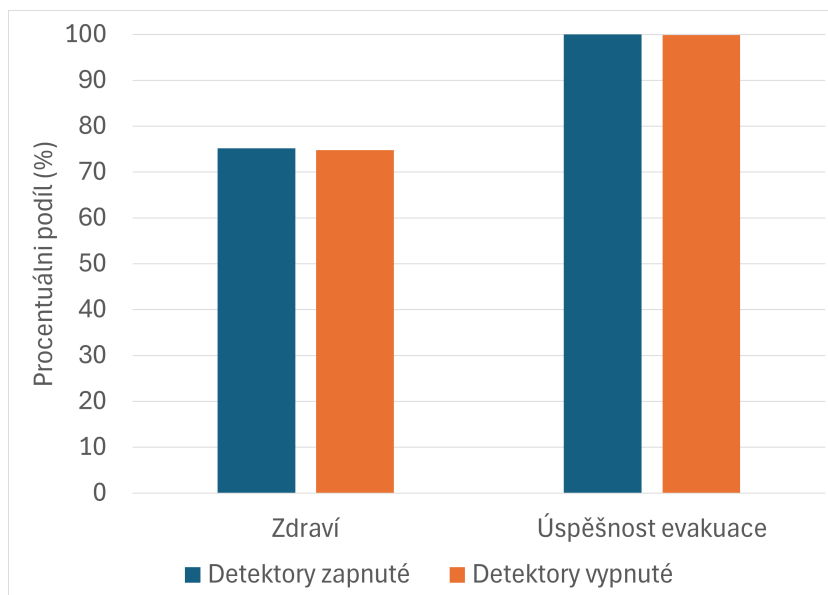
3.5.5 Vliv požárních detektorů

Tento experiment se zaměřil na hypotetickou situaci, ve které by nedošlo k aktivaci požárních detektorů a spuštění alarmu v prostředí. Časy $t_{detection}$ a t_{alarm} nejsou v tomto scénáři definovány a agenti se musí spolehnout pouze na vlastní pozorování a případné varování od ostatních. Cílem je zmapovat důležitost a užitečnost výstražného systému v tomto případě. Naměřené hodnoty jsou k dispozici v tabulce 18 a grafické porovnání oproti nastavení s funkčním alarmem je vidět v grafech na obrázcích 20 a 21.

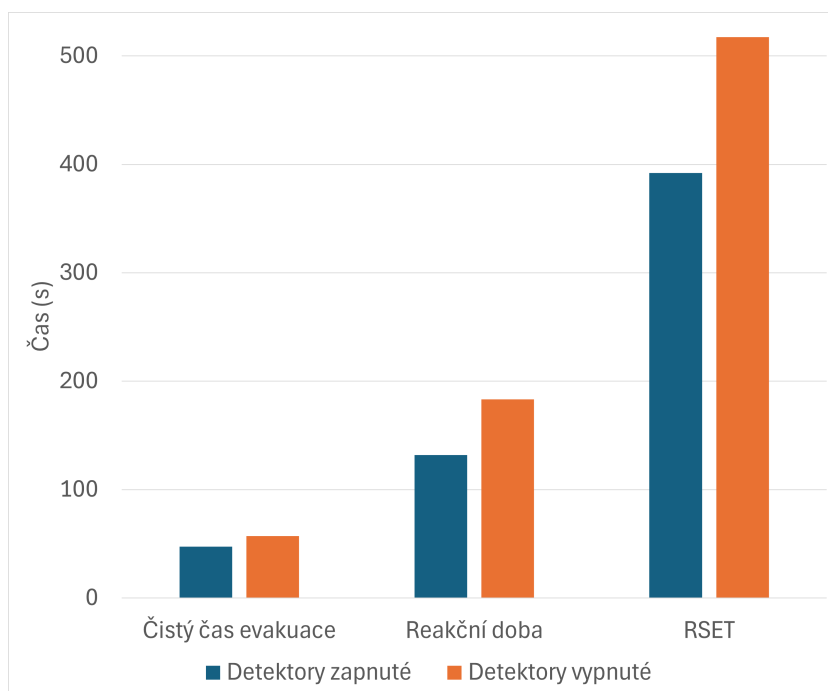
Tabulka 18: Naměřené hodnoty při vypnutých požárních detektorech.

| | |
|---------------------------|---------|
| Čistý čas evakuace | 57,2 s |
| Reakční doba ² | 183,4 s |
| RSET | 517,4 s |
| Zdraví | 74,8 % |
| Úspěšnost evakuace | 99,9 % |

²Vzhledem k vypnutému alarmu se v tomto případě jedná o časový interval od vzniku požáru do zahájení aktivity EVACUATE.



Obrázek 20: Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti při zapnutém a vypnutém alarmu.



Obrázek 21: Časy evakuace při zapnutém a vypnutém alarmu.

Ukazuje se, že vypnutí alarmu má vliv jak na průměrnou reakční dobu agentů, tak na celkový čas evakuace RSET. Oba ukazatele narostly zhruba o 40 % a o 30 % v porovnání se stavem, kdy v prostředí alarm funguje. Čistý čas evakuace se také zvýšil, a to přibližně o 20 %.

Na druhou stranu průměrný ukazatel zdraví se ve scénáři bez alarmu skoro nezměnil. Lze usuzovat, že dobře funguje systém varování mezi jednotlivými agenty, podpořený poměrně rychlým čistým časem evakuace, který je dán návrhem prostředí a rozmístěním evakuačních východů. Alarm má bezpochyby vliv na rozhodování agentů, kteří se nachází daleko od zdroje ohně. Proto v případě vypnutí detekce požáru tráví v prostředí více času.

Toto chování může být potenciálně nebezpečné a v navrženém scénáři se projevilo několika neúspěšnými evakuacemi. Zachování přibližně stejného průměrného zdraví může být dáno i tím, že v situaci bez alarmu agenti pokračují ve své běžné činnosti, což pro většinu z nich znamená setrvání v kanceláři, která je částečně uzavřená. Poskytuje tedy více ochrany před kouřem a zplodinami. Ve chvíli, kdy agenti nebezpečí zaznamenají, se pak už rovnou uchylují k evakuaci.

Naopak při reakci na alarm má většina agentů tendenci opustit svoje místo a začít shánět informace o tom, co se děje. Začnou proto pobíhat sem a tam, což může být v některých případech nebezpečnější než setrvání v kanceláři.

3.5.6 Vliv chování agentů

Z předchozích experimentů lze vidět výrazný podíl $t_{pre-movement}$ (reakční doba) na celkové době evakuace. To, jakým způsobem může chování agentů v daném čase ovlivnit průběh evakuace se pokusí demonstrovat následující experiment.

První případ se zaměřil na skupinu *ideálních agentů*. Tito agenti jsou modelováni tak, že se chovají téměř zcela dle požárních předpisů a evakuaci zbytečně neprotahují a neoddalují. Rozhodují se pro ni většinou už krátce po rozeznění alarmu, jehož varování neignorují a berou ho vážně. Rozdíl v chování oproti referenčním hodnotám uvádí tabulky 19, 20 a 21.

Tabulka 19: Změny v nastavení náhodných proměnných – ideální agent.

| | |
|--------------------------------|--|
| <code>ignoreAlarmAtAll</code> | Hodnota <code>false</code> s pravděpodobností 100 % |
| <code>alarmReactionTime</code> | Náhodné číslo z normálního rozdělení $N(15, 10)$ v intervalu $\langle 1, 30 \rangle$ (v sekundách) |

Ve druhém případě je naopak testována skupina *nezodpovědných agentů*. Ti mají tendenci na alarm reagovat velmi pozdě nebo vůbec. Pro evakuaci se často rozhodují

Tabulka 20: Matice přechodu mezi aktivitami pro AlarmBehaviour – ideální agent.

| | NONE | FINDING_INFO | EVACUATION_PREPARE | EVACUATE |
|--------------------|------|--------------|--------------------|----------|
| NONE | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,8 |
| FINDING_INFO | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,8 |
| EVACUATION_PREPARE | 0 | 0 | 0 | 1 |
| EVACUATE | 0 | 0 | 0 | 1 |

Tabulka 21: Matice přechodu mezi aktivitami pro FireBehaviour – ideální agent.

| | NONE | WARN_OTHERS | EVACUATION_PREPARE | EVACUATE |
|--------------------|------|-------------|--------------------|----------|
| NONE | 0 | 0,1 | 0,0 | 0,9 |
| WARN_OTHERS | 0 | 0,1 | 0,0 | 0,9 |
| EVACUATION_PREPARE | 0 | 0 | 0 | 0 |
| EVACUATE | 0 | 0 | 0 | 1 |

až po přímém kontaktu s požárem a před útekem mají tendenci vracet se do svých kanceláří pro osobní věci. Rozdíl v chování oproti výchozímu nastavení uvádí tabulky 22, 23 a 24.

Tabulka 22: Změny v nastavení náhodných proměnných – nezodpovědný agent.

| | |
|-------------------|---|
| ignoreAlarmAtAll | Hodnota true s pravděpodobností 30 % |
| alarmReactionTime | Náhodné číslo z normálního rozdělení $N(120, 60)$ v intervalu $\langle 30, 240 \rangle$ (v sekundách) |

Výsledky experimentu s různými typy agentů zachycuje tabulka 25. Porovnání s referenčním chováním je vidět na grafech 22 a 23.

Ideální agent zachycuje stav, jak by mohla evakuace vypadat, pokud by se drtivá většina účastníků chovala příkladě dle předpisů. Čistý čas evakuace se snížil téměř na polovinu a průměrná reakční doba se zkrátila na třetinu oproti referenčním hodnotám. Poslední agent opouští budovu po necelých pěti minutách. Průměrné ztráty na zdraví jsou velmi nízké.

Tabulka 23: Matice přechodu mezi aktivitami pro AlarmBehaviour – nezodpovědný agent.

| | NONE | FINDING_INFO | EVACUATION_PREPARE | EVACUATE |
|--------------------|------|--------------|--------------------|----------|
| NONE | 0 | 0,85 | 0,15 | 0,0 |
| FINDING_INFO | 0 | 0,85 | 0,15 | 0,0 |
| EVACUATION_PREPARE | 0 | 0 | 0 | 1 |
| EVACUATE | 0 | 0 | 0 | 0 |

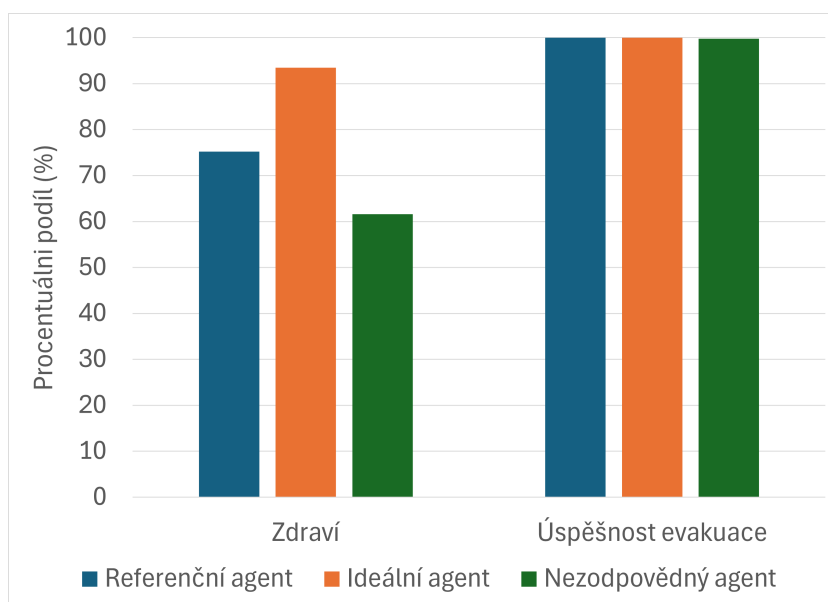
Tabulka 24: Matice přechodu mezi aktivitami pro FireBehaviour – nezodpovědný agent.

| | NONE | WARN_OTHERS | EVACUATION_PREPARE | EVACUATE |
|--------------------|------|-------------|--------------------|----------|
| NONE | 0 | 0,3 | 0,5 | 0,2 |
| WARN_OTHERS | 0 | 0,3 | 0,5 | 0,2 |
| EVACUATION_PREPARE | 0 | 0 | 0 | 1 |
| EVACUATE | 0 | 0 | 0 | 1 |

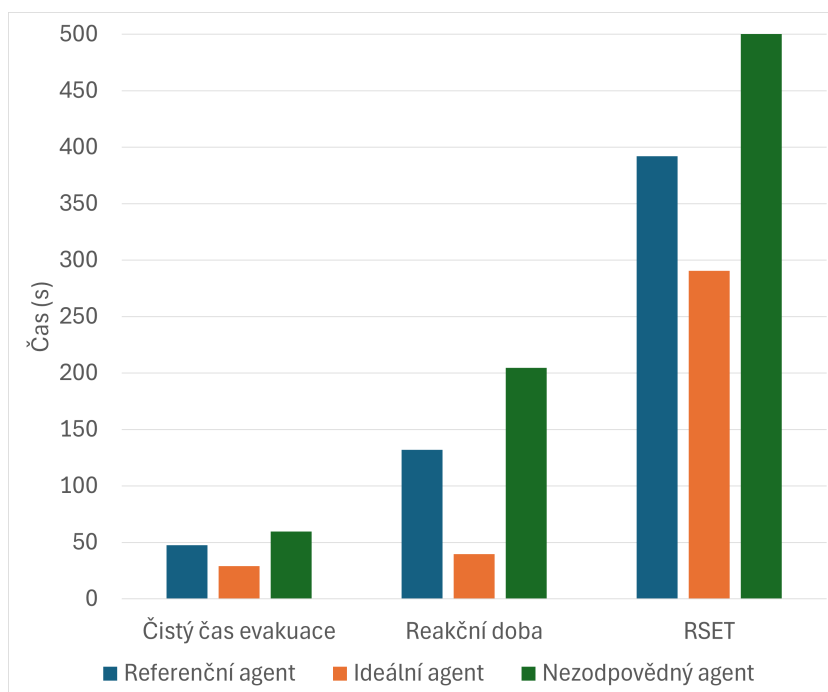
Tabulka 25: Naměřené hodnoty pro různá chování agentů.

| | Ideální agent | Nezodpovědný agent |
|--------------------|---------------|--------------------|
| Čistý čas evakuace | 29 s | 59,7 s |
| Reakční doba | 39,7 s | 204,7 s |
| RSET | 290,7 s | 506,6 s |
| Zdraví | 93,5 % | 61,6 % |
| Úspěšnost evakuace | 100 % | 99,8 % |

V případě nezodpovědných agentů se dle očekávání všechny intervaly protahují. Průměrně zde došlo k největšímu poklesu zdraví ze všech měřených scénářů. Ze srovnání s referenčními hodnotami, které by měly modelovat chování blízké realitě je nutné konstatovat, že mají výrazně blíže k nezodpovědným agentům než k ideálnímu stavu.



Obrázek 22: Procentuální podíl zdraví a úspěšnosti pro různá chování agentů.



Obrázek 23: Časy evakuace pro různá chování agentů.

4 Výsledky a diskuze

Kapitola pojednává o stručném shrnutí nejdůležitějších výsledků dosažených jak v teoretické, tak i praktické části této práce.

V teoretické části se podařilo představit základní motivaci pro kombinování agentového modelování s modely fluidní dynamiky a podrobněji rozebrat výhody tohoto propojení. Na několika příkladech se zaměřením na oblast evakuování osob práce s úspěchem demonstrovala použitelnost a proveditelnost tohoto přístupu v praxi, včetně ukázek konkrétních způsobů realizace a zmapování existujících softwarových nástrojů.

Na základě rešerše odborných článků věnujících se problematice evakuačního plánování byl vybrán směr, kterým by se tato práce mohla ubírat při tvorbě ukázkového modelu, aby poodkryla další méně probádaná místa v této oblasti. Modely popsané v části 2.4.1 se zabývají spíše většími veřejnými prostory (noční kluby, stadiony, knihovny), které jsou určené pro jednorázová setkávání velkého počtu osob. Díky tomu se soustředí primárně na propracovanost návrhu prostředí pomocí BIM a při popisu chování agentů často volí existující a obecné knihovny pro simulaci pohybu davu. Primárním cílem zde je co nejrychlejší opuštění budovy, při kterém se předpokládá velké riziko vzniku kolizí.

Navržený ukázkový model zkoumá šíření požáru v kancelářských prostorech s pohybujícími se zaměstnanci. Jedná o prostředí s menší hustotou osob, ve kterém méně působí davový efekt, díky čemuž více vyniká individuální nastavení jednotlivých lidí. Namísto použití univerzálních knihoven práce sestavuje vlastní popis chování agentů, založený na výsledcích více jak 150 odborných publikací s různými typy experimentů. Ten je následně přizpůsoben na míru vybranému prostředí a předpokládanému složení osob. Zároveň je návrh implementace proveden tak, aby se dal snadno měnit a přizpůsobovat i dalším scénářům.

Výsledkem provedených experimentů je zmapování vlivu různých parametrů prostředí (místo vzniku požáru, fungující alarm) a chování agentů (reakční doba, ignorování alarmu, pravděpodobnosti vykonávaných aktivit) na celkovou výši intervalu RSET včetně jeho jednotlivých částí a zdraví agentů. Následná analýza získaných dat identifikovala problematické vzorce chování vedoucí k největším ztrátám zdraví. Ukázalo se, že největší riziko pro agenty pramení z nedostatečně rychlé reakce a pomalé rychlosti chůze v kombinaci s požárem, který se rozšíří na velké části plánované únikové trasy.

Pokud se navíc agenti nachází daleko od východu, vede tento stav k poklesu zdraví na nulu a nedokončení evakuace. Práce následně zkoumala změnu sledovaných údajů při doporučeném postupu brzké evakuace, kde zjistila výrazné zkrácení časů o 30 % až 60 % a zlepšení zdraví o zhruba 20 %.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo prozkoumat možnosti propojení agentových modelů s modely dynamiky tekutin a pro vybraný problém takový ukázkový model navrhnout. V úvodu práce došlo k představení obecných principů modelování a uvedení seznamu základních kroků, podle kterých by se mělo při návrhu modelu postupovat. Dále se práce blíže věnovala základním charakteristikám modelování založeného na agentech i modelům popisujících pohyb tekutin. V dalších sekcích teoretické části byly podrobněji rozebrány důvody pro propojení obou modelovacích technik s uvedením několika příkladů. Následně se práce zacílila na problém evakuace osob z prostředí zasaženého požárem. Bylo představeno několik prací a odborných článků na dané téma, potvrzujících použitelnost tohoto přístupu v praxi.

Dále se práce blíže zaměřila na návrh a popis chování agentů účastnících se evakuace. Z toho důvodu podává stručný přehled poznatků z odborné literatury na základě široké škály provedených evakuačních experimentů. Z nich bylo vybráno několik typických projevů chování lidí v těchto situacích, které byly zohledněny při návrhu agentů v praktické části. Patří sem rychlost pohybu, reakce na alarm, kooperace s ostatními účastníky a způsob výběru evakuačních tras. Rozebráno bylo rovněž působení ohně a škodlivých látek obsažených v kouři na zdraví člověka.

Praktická část podrobně popisuje vytváření ukázkového modelu simulujícího evakuaci osob z prostředí reálné kancelářské budovy zasažené požárem dle doporučených kroků uvedených v teoretické části práce. K implementaci jsou využity softwarové nástroje AnyLogic a Fire Dynamics Simulator. Následuje rozbor jednotlivých kroků vedoucích k sestavení kombinovaného modelu s implementačními detaily včetně ukázky ze zdrojových kódů použitých programů.

S pomocí navrženého modelu bylo provedeno několik experimentů, díky kterým se podařilo odhadnout časy pro jednotlivé části intervalu RSET u vybraného prostředí a zdravotní dopady šířících se škodlivých látek na přítomné osoby. Výsledky experimentů ukázaly dostatečnou robustnost evakuačních cest a v drtivé většině případů i stoprocentní úspěšnost evakuace všech zúčastněných. Zcela jednoznačně se pak potvrdila důležitost včasné a rychlé reakce jednotlivých osob. V případě, kdy jejich chování bylo v souladu s běžnými doporučeními, se výrazně zlepšily jak všechny sledované časy,

tak celková míra zdraví při dosažení evakuačního východu. Naopak nezodpovědné chování v kombinaci s delší vzdáleností od cíle vedlo k otravě škodlivinami a smrti.

Přínos této práce spočívá v poskytnutí metodiky pro propojení obou zmíněných technik. Díky nim lze lépe porozumět komplexním interakcím mezi jednotlivými prvky zkoumaných systémů a efektivněji navrhovat strategie pro řešení krizových situací. Lze konstatovat, že propojení agentových modelů s modely fluidní dynamiky představuje perspektivní směr ve výzkumu simulace složitých systémů a má potenciál nalézt uplatnění napříč různými odvětvími. Práce se snaží přispět k rozvoji tohoto směru a poskytnout návod pro další studie a aplikace v této oblasti. Dále práce přináší podrobnější vhled do chování lidí při evakuaci v budovách zasažených požárem a na konkrétním modelu demonstruje vliv tohoto chování a jeho různých změn na celkový průběh a výsledek evakuace i zdraví osob.

Literatura

- [1] Opitz-Stapleton, S.; Sabbag, L.; Hawley, K.; et al. Heat index trends and climate change implications for occupational heat exposure in Da Nang, Vietnam. *Climate Services*, volume 2, Aug. 2016, doi:10.1016/j.cliser.2016.08.001.
- [2] Johnson-Laird, P. N. *Mental models: towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Number 6 in Cognitive science series, Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press, 6th edition, 1995, ISBN 978-0-674-56882-2 978-0-674-56881-5.
- [3] Conway, S. R. An Agent-Based Model for Analyzing Control Policies and the Dynamic Service-Time Performance of a Capacity-Constrained Air Traffic Management Facility. In *ICAS 2006 - 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, Hamburg, Jan. 2006, pp. 1–8, nTRS Author Affiliations: NASA Langley Research Center NTRS Document ID: 20060048296 NTRS Research Center: Langley Research Center (LaRC). Available from: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20060048296>
- [4] Aleman, D. M.; Wibisono, T. G.; Schwartz, B. Accounting for individual behaviors in a pandemic disease spread model. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*, Dec. 2009, pp. 1977–1985, doi:10.1109/WSC.2009.5429727, iSSN: 1558-4305.
- [5] Bookstaber, R. Using Agent-Based Models for Analyzing Threats to Financial Stability. *SSRN Electronic Journal*, 2012, ISSN 1556-5068, doi:10.2139/ssrn.2642420. Available from: <http://www.ssrn.com/abstract=2642420>
- [6] Madella, M.; Rondelli, B.; Lancelotti, C.; et al. Introduction to Simulating the Past. *Journal of Archaeological Method and Theory*, volume 21, no. 2, June 2014: pp. 251–257, ISSN 1573-7764, doi:10.1007/s10816-014-9209-8. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10816-014-9209-8>
- [7] Shoeibi, S.; Kargarsharifabad, H.; Rahbar, N.; et al. Performance evaluation of a solar still using hybrid nanofluid glass cooling-CFD simulation and environmental

- analysis. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, volume 49, Feb. 2022: p. 101728, ISSN 2213-1388, doi:10.1016/j.seta.2021.101728. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821007426>
- [8] Tian, W.; Han, X.; Zuo, W.; et al. Building Energy Simulation Coupled with CFD for Indoor Environment: A Critical Review and Recent Applications. *Energy and Buildings*, volume 165, Apr. 2018, doi:10.1016/j.enbuild.2018.01.046.
- [9] Adnoui, M.; Jiang, L.; Zhang, X. J.; et al. Computational modelling for decarbonised drying of agricultural products: Sustainable processes, energy efficiency, and quality improvement. *Journal of Food Engineering*, volume 338, Feb. 2023: p. 111247, ISSN 0260-8774, doi:10.1016/j.jfoodeng.2022.111247. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877422003016>
- [10] Pelánek, R. *Modelování a simulace komplexních systémů*. Nakladatelství Masarykovy univerzity, 2011, ISBN 978-80-210-5318-2.
- [11] Franklin, S.; Graesser, A. Is It an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. In *Intelligent Agents III Agent Theories, Architectures, and Languages*, edited by J. P. Müller; M. J. Wooldridge; N. R. Jennings, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg: Springer, 1997, ISBN 978-3-540-68057-4, pp. 21–35, doi:10.1007/BFb0013570.
- [12] Wooldridge, M. Intelligent Agents: The Key Concepts. In *Multi-Agent Systems and Applications II*, edited by V. Mařík; O. Štěpánková; H. Krautwurmová; M. Luck, Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Heidelberg: Springer, 2002, ISBN 978-3-540-45982-8, pp. 3–43, doi:10.1007/3-540-45982-0_1.
- [13] Russell, S. J.; Norvig, P. *Artificial intelligence: a modern approach*. Pearson series in artificial intelligence, Hoboken: Pearson, fourth edition edition, 2021, ISBN 978-0-13-461099-3.
- [14] Macal, C.; North, M. Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, Savannah, GA, USA: IEEE, Dec. 2014, ISBN 978-1-4799-7486-3 978-1-4799-7484-9, pp.

6–20, doi:10.1109/WSC.2014.7019874. Available from:

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7019874/>

- [15] Johnston, N.; Greene, D. *Conway’s Game of Life: Mathematics and Construction*. Canada: Lulu.com, Nov. 2021, ISBN 978-1-79481-696-1.
- [16] Schinko, C.; Shao, L.; Mueller-Roemer, J.; et al. Accelerated Airborne Virus Spread Simulation: Coupling Agent-Based Modeling with GPU-Accelerated Computational Fluid Dynamics. In *GRAPP 2022: 17th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, Dec. 2021, pp. 1–8, doi:10.5220/0010904500003124.
- [17] Corti, A.; Chiastra, C.; Colombo, M.; et al. A fully coupled computational fluid dynamics – Agent-based model of atherosclerotic plaque development: Multiscale modeling framework and parameter sensitivity analysis. *Computers in Biology and Medicine*, volume 118, Jan. 2020: p. 103623, doi:10.1016/j.combiomed.2020.103623.
- [18] Viksnin, I.; Lyakhovenko, J.; Tursukov, N.; et al. Empirical Study on Modeling of People Behavior in Emergency. 2019.
- [19] Epstein, J. M.; Pankajakshan, R.; Hammond, R. A. Combining Computational Fluid Dynamics and Agent-Based Modeling: A New Approach to Evacuation Planning. *PLOS ONE*, volume 6, no. 5, 2011: p. e20139, ISSN 1932-6203, doi:10.1371/journal.pone.0020139, publisher: Public Library of Science. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0020139>
- [20] Scherer, R. J.; Trung Luu, N.; Katranuschkov, P.; et al. TOWARDS A MULTIMODEL APPROACH FOR SIMULATION OF CROWD BEHAVIOUR UNDER FIRE AND TOXIC GAS EXPANSION IN BUILDINGS. In *2018 Winter Simulation Conference (WSC)*, Dec. 2018, pp. 3965–3976, doi:10.1109/WSC.2018.8632341, iSSN: 1558-4305.
- [21] Jin, M.; Zuo, W.; Chen, Q. Improvements of Fast Fluid Dynamics for Simulating Air Flow in Buildings. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*,

- volume 62, no. 6, Jan. 2012: pp. 419–438, ISSN 1040-7790,
doi:10.1080/10407790.2012.724988, publisher: Taylor & Francis _eprint:
<https://doi.org/10.1080/10407790.2012.724988>. Available from:
<https://doi.org/10.1080/10407790.2012.724988>
- [22] Jiang, S.; Wang, C.; Bimenyimana, S.; et al. Standard operational procedures (SOP) for effective fire safety evacuation visualization in college dormitory buildings. *Journal of Visualization*, volume 24, no. 6, Dec. 2021: pp. 1207–1235, ISSN 1875-8975, doi:10.1007/s12650-021-00761-3. Available from:
<https://doi.org/10.1007/s12650-021-00761-3>
- [23] Yi, S.; Shi, J. An Agent-Based Simulation Model for Occupant Evacuation under Fire Conditions. In *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*, volume 1, May 2009, pp. 27–31, doi:10.1109/GCIS.2009.442, iISSN: 2155-6091.
- [24] Adjiski, V.; Mirakovski, D.; Despodov, Z.; et al. Simulation and optimization of evacuation routes in case of fire in underground mines. *Journal of Sustainable Mining*, volume 14, no. 3, Jan. 2015: pp. 133–143, ISSN 2300-3960, doi:10.1016/j.jsm.2015.10.001. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S230039601530001X>
- [25] Ehtamo, H.; Heliövaara, S.; Hostikka, S.; et al. Modeling Evacuees' Exit Selection with Best Response Dynamics. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, edited by W. W. F. Klingsch; C. Rogsch; A. Schadschneider; M. Schreckenberg, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, ISBN 978-3-642-04504-2, pp. 309–319, doi:10.1007/978-3-642-04504-2_27.
- [26] Haghani, M.; Sarvi, M. Crowd behaviour and motion: Empirical methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, volume 107, Jan. 2018: pp. 253–294, ISSN 0191-2615, doi:10.1016/j.trb.2017.06.017. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261517303788>
- [27] Schadschneider, A.; Klüpfel, H.; Kretz, T.; et al. Fundamentals of Pedestrian and Evacuation Dynamics. In *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, Information Science Reference, June 2009, ISBN 978-1-60566-226-8,

- pp. 124–154, doi:10.4018/9781605662268.ch006, journal Abbreviation:
Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering.
- [28] Zakaria, W.; Yusof, U. K. Modelling crowd behaviour during emergency evacuation: A proposed framework. In *2016 International Conference On Advanced Informatics: Concepts, Theory And Application (ICAICTA)*, Aug. 2016, pp. 1–6, doi:10.1109/ICAICTA.2016.7803117. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7803117>
- [29] Jeong, B. J. *Combination of CFD and evacuation models for determination of FED and FEC levels*. Diplomová práce, Lund University, Lund, 2014. Available from: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/4496826>
- [30] Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; et al. Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, volume 45, no. 1, Jan. 2010: pp. 1–11, ISSN 0379-7112, doi:10.1016/j.firesaf.2009.08.005. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711209001167>
- [31] Mu H.l.; Wang J.h.; Mao Z.l.; et al. Pre-Evacuation Human Reactions in Fires: An Attribution Analysis Considering Psychological Process. *Procedia Engineering*, volume 52, Jan. 2013: pp. 290–296, ISSN 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2013.02.142. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813002610>
- [32] Gerges, M.; Mayouf, M.; Rumley, P.; et al. Human-Behaviour under Fire situations in High Rise residential Building. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, volume 35, no. 1, Apr. 2017: pp. 90–106, ISSN 2398-4708, doi:10.1108/IJBPA-09-2016-0022, number: 1 Publisher: Emerald. Available from: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-09-2016-0022>
- [33] Lama, C.; González-Gaya, C.; Sanchez-Lite, A. An Experimental Test Proposal to Study Human Behaviour in Fires Using Virtual Environments. *Sensors*, volume 20, June 2020: p. 3607, doi:10.3390/s20123607.
- [34] Garcimartín, A.; Zuriguel, I.; Pastor, J. M.; et al. Experimental Evidence of the “Faster Is Slower” Effect. *Transportation Research Procedia*, volume 2, Jan. 2014:

- pp. 760–767, ISSN 2352-1465, doi:10.1016/j.trpro.2014.09.085. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146514001215>
- [35] Lin, P.; Ma, J.; Liu, T.; et al. An experimental study of the “faster-is-slower” effect using mice under panic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, volume 452, June 2016: pp. 157–166, ISSN 0378-4371, doi:10.1016/j.physa.2016.02.017. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437116001837>
- [36] Fridolf, K.; Nilsson, D.; Frantzich, H.; et al. Walking Speed in Smoke: Representation in Life Safety Verifications. In *The 12th International Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Methods*, Apr. 2018, pp. 1–6.
- [37] Dias, C.; Sarvi, M.; Shiwakoti, N.; et al. Turning Angle Effect on Emergency Egress: Experimental Evidence and Pedestrian Crowd Simulation. *Transportation Research Record*, volume 2312, no. 1, Jan. 2012: pp. 120–127, ISSN 0361-1981, doi:10.3141/2312-12, publisher: SAGE Publications Inc. Available from: <https://doi.org/10.3141/2312-12>
- [38] Kobes, M.; Helsloot, I.; de Vries, B.; et al. Way finding during fire evacuation; an analysis of unannounced fire drills in a hotel at night. *Building and Environment*, volume 45, no. 3, Mar. 2010: pp. 537–548, ISSN 0360-1323, doi:10.1016/j.buildenv.2009.07.004. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309001759>
- [39] Bode, N. W. F.; Kemloh Wagoum, A. U.; Codling, E. A. Human responses to multiple sources of directional information in virtual crowd evacuations. *Journal of The Royal Society Interface*, volume 11, no. 91, Feb. 2014: p. 20130904, doi:10.1098/rsif.2013.0904, publisher: Royal Society. Available from:
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsif.2013.0904>
- [40] Olander, J.; Ronchi, E.; Lovreglio, R.; et al. Dissuasive exit signage for building fire evacuation. *Applied Ergonomics*, volume 59, Mar. 2017: pp. 84–93, ISSN 0003-6870, doi:10.1016/j.apergo.2016.08.029. Available from:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000368701630182X>

- [41] Kinateder, M.; Ronchi, E.; Gromer, D.; et al. Social influence on route choice in a virtual reality tunnel fire. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, volume 26, Sept. 2014: pp. 116–125, ISSN 1369-8478, doi:10.1016/j.trf.2014.06.003. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847814000771>
- [42] Moussaïd, M.; Guillot, E. G.; Moreau, M.; et al. Traffic Instabilities in Self-Organized Pedestrian Crowds. *PLOS Computational Biology*, volume 8, no. 3, 2012: p. e1002442, ISSN 1553-7358, doi:10.1371/journal.pcbi.1002442, publisher: Public Library of Science. Available from: <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1002442>
- [43] Lovreglio, R.; Fonzone, A.; dell’Olio, L.; et al. A study of herding behaviour in exit choice during emergencies based on random utility theory. *Safety Science*, volume 82, Feb. 2016: pp. 421–431, ISSN 0925-7535, doi:10.1016/j.ssci.2015.10.015. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753515002763>
- [44] Haghani, M.; Sarvi, M. Identifying Latent Classes of Pedestrian Crowd Evacuees. *Transportation Research Record*, volume 2560, no. 1, Jan. 2016: pp. 67–74, ISSN 0361-1981, doi:10.3141/2560-08, publisher: SAGE Publications Inc. Available from: <https://doi.org/10.3141/2560-08>
- [45] Faria, J. J.; Dyer, J. R. G.; Tosh, C. R.; et al. Leadership and social information use in human crowds. *Animal Behaviour*, volume 79, no. 4, Apr. 2010: pp. 895–901, ISSN 0003-3472, doi:10.1016/j.anbehav.2009.12.039. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003347210000047>
- [46] Alarifi, A. A. S.; Phylaktou, H. N.; Andrews, G. E. What Kills People in a Fire? Heat or Smoke? In *the 9th Saudi Students Conference*, Birmingham, Jan. 2016, pp. 1–10, conference Name: The 9th Saudi Students Conference Meeting Name: The 9th Saudi Students Conference Place: Birmingham, UK Publisher: Leeds. Available from: <https://eprints.whiterose.ac.uk/96795/>

- [47] EPA, U. Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals. Nov. 2013. Available from: <https://www.epa.gov/aegl>
- [48] Purser, D. Toxic hazard calculation models for use with fire effluent data. In *Fire Toxicity*, Woodhead Publishing, Dec. 2010, ISBN 978-1-84569-502-6, pp. 619–636, doi:10.1533/9781845698072.6.620.
- [49] Abar, S.; Theodoropoulos, G. K.; Lemarinier, P.; et al. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*, volume 24, May 2017: pp. 13–33, ISSN 1574-0137, doi:10.1016/j.cosrev.2017.03.001. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013716301198>
- [50] Pal, C.-V.; Leon, F.; Paprzycki, M.; et al. A Review of Platforms for the Development of Agent Systems. *Information*, volume 14, no. 6, June 2023: p. 348, ISSN 2078-2489, doi:10.3390/info14060348, arXiv:2007.08961 [cs]. Available from: <http://arxiv.org/abs/2007.08961>
- [51] AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions for Business. Available from: <https://www.anylogic.com/>
- [52] FDS-SMV. Available from: <https://pages.nist.gov/fds-smv/index.html>
- [53] McGrattan, K. B.; Hostikka, S.; McDermott, R.; et al. Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide. *NIST Special Publication*, 2018, doi:10.6028/NIST.SP.1018. Available from: https://github.com/firemodels/fds/releases/download/FDS6.7.0/FDS_Technical_Reference_Guide.pdf
- [54] National Weather Service. Available from: https://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml
- [55] National Research Council (US) Committee on Acute Exposure Guideline Levels. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 8*. Washington (DC): National Academies Press (US), 2010, ISBN 978-0-309-14515-2. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK220007/>

- [56] National Research Council (US) Subcommittee on Acute Exposure Guideline Levels. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4*. Washington (DC): National Academies Press (US), 2004, ISBN 978-0-309-09147-3 978-0-309-53013-2. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK207738/>

Seznam zkratek

ABM – Agent-Based Model

CFD – Computational Fluid Dynamics

FDS – Fire Dynamics Simulator

BIM – Building Information Modeling

IFC – Industry Foundation Classes

ASET – Available Safe Egress Time

RSET – Required Safe Egress Time

GIS – Geografický informační systém

AEGLs – Acute Exposure Guideline Levels

Přílohy

A Obsah elektronické přílohy

- **Experimenty** – adresář s naměřenými daty, která byla použita v tabulkách a grafech v textu práce.
- **Anylogic** – adresář obsahující navržený model `OfficeModel` v programu AnyLogic. Model byl vytvořen ve verzi AnyLogic 8.8.4.
- **FDS** – adresář s modely šíření požáru v programu FDS. Modely byly vytvořeny ve verzi FDS 6.7.0. Adresář rovněž obsahuje skripty v jazyce Python pro extrakci dat.
 - **OfficeModel;default** – model šíření požáru z výchozí lokace.
 - **OfficeModel;scenar1** – model šíření požáru pro scénář 1.
 - **OfficeModel;scenar2** – model šíření požáru pro scénář 2.
 - **OfficeModel;scenar3** – model šíření požáru pro scénář 3.
 - **OfficeModel;scenar4** – model šíření požáru pro *větší požár*.
 - **OfficeModel;scenar5** – model šíření požáru pro *menší požár*.
- **AnylogicToFdsConverter** – adresář se zdrojovými kódy konzolové aplikace v jazyce C#, která slouží pro převod vybraných komponent vytvořených v softwaru AnyLogic do formátu podporovaného programem FDS.

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------------------|---|
| Autor: | Bc. Michal Nekvinda |
| Studium: | I2000313 |
| Studijní program: | N1802 Aplikovaná informatika |
| Studijní obor: | Aplikovaná informatika |
| Název diplomové práce: | Dynamika tekutin a agentové modely |
| Název diplomové práce AJ: | Fluid Dynamics and Agent-Based Models |

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Cílem práce je popsat možnosti propojení modelů fluidní dynamiky s agentovými modely, navrhnout a realizovat ukázkový model.

Osnova:

1. Úvod
 - 1.1. Motivace
 - 1.2. Cíl práce
2. Teoretická část
 - 2.1. Modelování dynamiky kapalin
 - 2.2. Agentové modely
 - 2.3. Propojení modelů
3. Praktická část
 - 3.1. Návrh modelu
 - 3.2. Výběr nástroje pro tvorbu modelu
 - 3.3. Implementace modelu
 - 3.4. Experimenty
4. Výsledky a diskuze
5. Závěr

Epstein JM, Pankajakshan R, Hammond RA (2011) Combining Computational Fluid Dynamics and Agent-Based Modeling: A New Approach to Evacuation Planning. PLoS ONE 6(5): e20139. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020139>

Zadávající pracoviště: Katedra informačních technologií,
Fakulta informatiky a managementu

Vedoucí práce: doc. RNDr. Kamila Štekerová, Ph.D., MSc.

Oponent: Ing. Tomáš Nacházel, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 15.10.2021