

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

SIMULÁTOR ŠÍŘENÍ POŽÁRŮ ZALOŽENÝ NA CELULÁRNÍCH AUTOMATECH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DANIEL DANIŠ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

SIMULÁTOR ŠÍŘENÍ POŽÁRŮ ZALOŽENÝ NA CELULÁRNÍCH AUTOMATECH

SIMULATOR OF FIRE SPREADING BASED ON CELLULAR AUTOMATA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

DANIEL DANIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB ŽÁK

BRNO 2013

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a implementací simulátoru lesního požáru založeného na celulárních automatech. Text práce je rozdělen na teoretickou a praktickou část. V teoretické části bude nejdříve čtenář obeznámen s problematikou celulárních automatů. Následně bude popsán model na predikci chování lesního požáru a výpočty jednotlivých parametrů a koeficientů modelu. Praktická část obsahuje popis architektury simulátoru a klíčových aspektů jeho implementace. Důraz je kladen také na experimenty se simulátorem a následné ověření jeho validity. Výsledkem práce je simulátor, grafická aplikace, použitelná na predikci šíření lesního požáru v různých podmínkách.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design and implementation of forest fire simulator based on cellular automaton. Text of the thesis is divided into theoretical and practical part. In theoretical part the reader will be acknowledged with the domain of cellular automaton. Consequently, the model for the prediction of forest fire behavior will be described and the calculations for various parameters and particular coefficients of this model will be presented. Practical part of the thesis contains description of simulator architecture as well as key aspects of its implementation. Moreover, the emphasis is being placed on experiments with simulator and consecutive testing of its validity. The results of the thesis are: simulator, graphical application usable for the purposes of forest fire spreading prediction in different conditions.

Klíčová slova

celulární automat, bunečný automat, simulátor, lesní požár, šíření požáru, chování požáru

Keywords

cellular automaton, simulator, forest fire, spread of fire, fire behavior

Citace

Daniel Daniš: Simulátor šíření požárů založený na celulárních automatech, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2013

Simulátor šíření požárů založený na celulárních automatech

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a pod vedením pana Ing. Jakuba Žáka. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Daniel Daniš
14. května 2013

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Jakubovi Žákovi za kontrolu mých textů, jeho ochotu a odborné rady na konzultacích a v neposlední řadě také za pomoc při výběru tématu mé práce.

© Daniel Daniš, 2013.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

Úvod	3
1 Celulárne automaty	4
1.1 História	4
1.2 Definícia celulárneho automatu	5
1.2.1 Základné vlastnosti	5
1.2.2 Formálna definícia	5
1.2.3 Definícia okolia	6
1.2.4 Pravidlá	7
1.3 Klasifikácia celulárnych automatov	7
1.4 Využitie CA na simuláciu požiaru	8
2 Teoretický rozbor použitého modelu	10
2.1 Definovanie základných vlastností použitého CA	10
2.2 Popis modelu pre šírenie požiaru	13
2.3 Veľkosť diskrétného časového kroku	14
2.4 Model vetra	15
2.5 Vplyv členitosti horského povrchu	16
2.6 Rýchlosť šírenia požiaru	17
2.7 Lokálna prechodová funkcia	19
2.8 Mechanizmus odletovania iskier	21
3 Výpočet parametrov modelu	22
3.1 Parametre a typy lesného povrchu	22
3.2 Koeficient vplyvu vetra	23
3.3 Koeficient vplyvu členitosti horského povrchu	25
4 Architektúra simulátoru	26
4.1 Základné charakteristiky	26
4.2 Simulačný model	27
4.3 Užívateľské rozhranie	28
5 Implementácia simulátoru	29
5.1 Hlavné okno programu (trieda <code>MainWindow</code>)	29
5.2 Kresliace plátno (trieda <code>GLPaintingWidget</code>)	30
5.3 3D zobrazenie terénu (trieda <code>GLWidget3D</code>)	31
5.4 Simulačný model (trieda <code>CellularAutomaton</code>)	32
5.5 Štatistiky simulácie (trieda <code>SimulationStats</code>)	32

6	Experimenty so simulátorom	33
6.1	Horľavosť horského povrchu	33
6.2	Vietor	34
6.3	Členitosť horského povrchu	34
6.4	Odletovanie iskier	35
6.4.1	Vplyv vetra na odletovanie iskier	35
6.4.2	Prekonanie prirodzenej prekážky	36
6.5	Komplexný experiment	37
6.6	Overenie validity	37
	Záver	41
	A Obrázky výslednej aplikácie simulátora	45
	B Obsah CD	47

Úvod

Táto práca sa zaoberá návrhom a implementáciou simulátora pre šírenie lesného požiaru založeného na celulárnych automatoch. Pri boji proti lesným požiarom je potrebné pochopiť jeho správanie a v najlepšom prípade ho vedieť aj predpovedať. K tomu je potrebné vedieť, ktoré faktory vplývajú na rýchlosť, smer a intenzitu požiaru.

Pri študovaní lesných požiarov bolo vykonaných mnoho experimentov, vrátane experimentov s kontrolovanými požiarimi. Výsledky týchto experimentov boli dôkladne zdokumentované, a neskôr využité pri tvorbe simulačných modelov, ktorých úlohou bolo čo najpresnejšie zopakovať alebo predpovedať priebeh požiaru. Medzi najznámejšie a najdokonalejšie simulátory lesných požiarov patrí americký FARSITE [9] a kanadský PROMETHEUS [22], ktoré sú využívané rôznymi štátnymi agentúrami na správu lesov a národných parkov.

Úlohou tejto práce je navrhnúť a implementovať simulátor lesného požiaru založený na celulárnych automatoch, ktorý by dokázal pokiaľ možno čo najpresnejšie predpovedať správanie a vývoj požiaru.

V úvodnej časti dokumentu bude čitateľ zoznámený s problematikou celulárnych automatov, ktorých základné znalosti sú potrebné na pochopenie ďalšieho textu. Povieme si niečo o ich histórii a dôvodoch vzniku, rozoberieme si ich funkčnosť, vlastnosti a použitie na simuláciu lesných požiarov. Potom bude prezentovaný použitý model na simuláciu lesného požiaru, kde budú popísané jeho jednotlivé časti a vysvetlená funkčnosť. Následne si rozoberieme výpočet hlavných koeficientov a parametrov modelu a ich vplyv na šírenie lesného požiaru. V ďalšej časti textu sa budeme venovať návrhu architektúry samotného simulátora a jeho implementácii, v ktorej si stručne rozoberieme hlavné časti. V poslednej kapitole budú prezentované rôzne experimenty so simulátorom za účelom demonštrácie jeho funkčnosti. Záver textu sa bude venovať overeniu validity simulačného modelu pomocou výsledkov simulácie vzťahujúcich sa k zvoleným referenčným modelom.

Kapitola 1

Celulárne automaty

1.1 História

Počiatky vzniku celulárnych, niekedy pomenovaných aj ako bunečných, automatov (ďalej aj ako CA) siahajú do 40. rokov dvadsiateho storočia, kedy sa maďarský matematik John Von Neumann snažil navrhnúť dynamický systém pre použitie v biológii, ktorý by bol schopný samo-reprodukcie, resp. vytvorenia kópie seba samého. V tom istom čase jeho kolega Stanislaw Ulam študoval rast kryštálu použitím jednoduchej sieťovej mriežky na jeho model. Výsledkom ich spoločnej práce bol vznik prvého celulárneho automatu na začiatku 50. rokov dvadsiateho storočia [27] [25].

O veľkú popularizáciu celulárnych automatov sa postaral John Horton Conway, ktorého experimenty s dvoj-dimenziálnym celulárnym automatom (ďalej ako 2D CA) viedli k objavu sady pravidiel – lokálnej prechodovej funkcie, platnej pre všetky bunky, ktorá viedla ku komplexnému chovaniu. Tento systém pomenoval ako Hra života¹.

Hra života svojim komplexným správaním pripomína vývoj spoločenstva živých organizmov. V roku 1970 bola publikovaná ako článok v rubrike Matematické hry v časopise Scientific American. Po jej predstavení nasledoval dva roky trvajúci medzinárodný rozruch a značné úsilie bolo venované experimentovaniu s počiatočnými podmienkami, ktoré by viedlo k osobitnej forme správania. Štúdia celulárnych automatov ale ešte stále nebola považovaná za vedeckú disciplínu [24].

To sa zmenilo začiatkom 80. rokov dvadsiateho storočia, kedy britský fyzik Stephen Wolfram v seminárnej práci predstavil prvú vážnu odbornú štúdiu o celulárnych automatoch. V tejto ako aj v sérii ďalších prác, ktoré nasledovali skúmal rôzne vzory ktoré sa bežne objavujú v prírode a je ich možné vytvárať pomocou jednoduchých pravidiel celulárnych automatov [20].

V roku 1983 vytvoril jedno-dimenziálny CA s jednoduchým pravidlom, ktoré pomenoval ako *Rule 30* a je to podľa jeho vlastných slov jeho najobľúbenejšie pravidlo. Toto pravidlo je zvlášť zaujímavé tým, že pomocou jednoduchých, dobre definovaných, pravidiel produkuje komplexné, zdanlivo náhodné vzory. Z tohoto dôvodu sa Wolfram začal domnievať, že toto pravidlo, ako aj celulárne automaty všeobecne, sú kľúčom k pochopeniu toho, ako pomocou jednoduchých pravidiel produkovať zložité štruktúry a správanie v prírode. Napríklad vzor pripomínajúci *Rule 30* sa objavuje rozťahnutý na ulite morského ulitníka s názvom *Conus textile* [27] [26].

Toto ako aj mnoho ďalších pravidiel Wolfram popísal v roku 2002 vo svojej knihe *A New*

¹anglicky *The Game of Life*

Kind of Science, ktorá sa stala ďalším milníkom v histórii celulárnych automatov. V knihe zároveň zdôrazňuje, že objavy o celulárnych automatoch majú význam pre všetky obory vedy.

1.2 Definícia celulárneho automatu

Pretože sa celulárne automaty považujú za najjednoduchšiu matematickú reprezentáciu zložitých komplexných systémov, tak majú veľké uplatnenie na simuláciu správania množstva reálnych komplexných systémov, vrátane nervových sietí, molekulových dynamických systémov, prírodnej ekológie, ekonomike a v mnohých ďalších [12].

Celulárny automat je dynamický systém, ktorý je diskretný v priestore aj čase. Tvori ho pravidelná štruktúra buniek v N -rozmernom priestore. Táto štruktúra má typicky tvar štvorcovej mriežky, ale môže byť napríklad aj šesťuholníková. Stav jednotlivých buniek sú pravidelne aktualizované deterministickou lokálnou prechodovou funkciou, ktorá je pre všetky bunky rovnaká [11].

1.2.1 Základné vlastnosti

Napriek tomu, že existuje veľa druhov celulárnych automatov a každý je prispôsobený na špecifické požiadavky konkrétneho systému, väčšina z nich má spoločných päť nasledujúcich charakteristík [12]:

- **Diskrétna mriežka buniek:** systém je najčastejšie tvorený jedno-, dvoj- alebo trojdimenzionálnou mriežkou buniek.
- **Homogenita:** všetky bunky sú rovnaké.
- **Diskrétny stavy:** každá bunka nadobúda jeden z konečného počtu možných diskretných stavov (napríklad $\{0, 1\}$).
- **Miestna interakcia:** vzájomne na seba pôsobia iba bunky, ktoré sa nachádzajú v lokálnom okolí.
- **Diskrétna dynamika:** pre každú jednotku diskretného času, každá bunka aktualizuje svoj stav na základe prechodového pravidla, ktoré berie do úvahy aktuálny stav bunky a buniek v jej okolí: $s(t+1) = f(s(t), N_s(t))$. Kde $s(t+1)$ značí stav bunky v čase $t+1$, a ten je daný funkciou aktuálneho stavu s a stavov susedných buniek N_s v čase t .

1.2.2 Formálna definícia

Formálna definícia celulárneho automatu je uvedená v nasledujúcej definícii 1.2.1 [15].

Definícia 1.2.1. d -dimenzionálny celulárny automat (d -CA) je štvorica $\mathcal{A} = (Z^d, S, N, \delta)$, kde:

Z^d je d -dimenzionálny bunečný priestor,

S je konečná množina všetkých stavov \mathcal{A} ,

N je konečná, usporiadaná podmnožina Z^d , $N = \{\vec{n}_j / \vec{n}_j = (x_{1j}, \dots, x_{dj}), j \in \{1, \dots, n\}\}$, nazývaná ako *okolie* \mathcal{A} ,

$\delta : S^{n+1} \mapsto S$ je lokálna prechodová funkcia lokálneho pravidla \mathcal{A}^l .

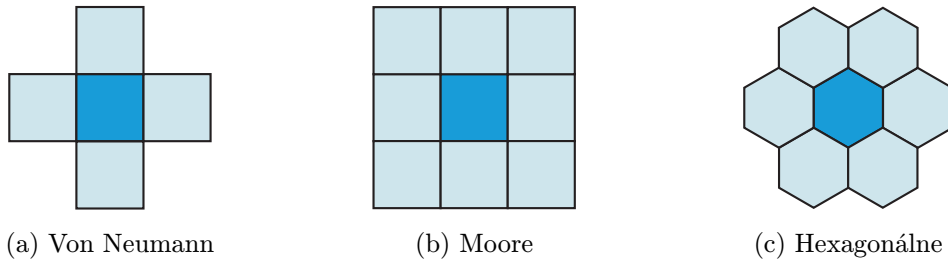
Medzi stavmi sú niekedy rozlišované stavy s , nazývané *kľudové stavy*, $\delta(s, \dots, s) = s$.

Každá bunka môže nadobúdať jeden z konečnej množiny stavov. Špeciálnym typom sú dvoj-stavové² CA, ktoré rozlišujú práve dva stavy a to živú a mŕtvu bunku. Hodnoty stavov buniek v ďalšom časovom kroku sú počítané paralelne. Argumenty lokálnej prechodovej funkcie sú: stav vyšetrovanej bunky pre ktorú sa počíta stav v ďalšom kroku a stavy všetkých susediacich buniek [6].

1.2.3 Definícia okolia

Okolie je dané susednými bunkami a hlavnou bunkou c samotnou³ a je to množina buniek, na základe ktorej sa počíta nasledujúci stav bunky c .

Používa sa viacero druhov okolí, z ktorých najpoužívanejšie pre 2D CA sú zobrazené na obrázku 1.1. Na obrázku môžeme vidieť Von Neumannovo okolie 1.1a, ktoré pozostáva zo štyroch horizontálne a vertikálne priľahlých buniek a z hlavnej bunky samotnej, ktorá sa nachádza v strede. Mooreovo okolie je vidieť na obrázku 1.1b a pozostáva z hlavnej bunky a zo všetkých ôsmich priľahlých susedných buniek. Na poslednom obrázku 1.1c je znázornená šesťuholníková mriežka, kde je okolie tvorené šiestimi priamo susediacimi bunkami a hlavnou bunkou.



Obr. 1.1: Príklady okolí 2D CA

V princípe môže byť okolie tvorené ľubovoľnou usporiadanou konečnou množinou. V prípade Von Neumannovho a Mooreovho okolia je okolie tvorené priamo susediacimi bunkami.

Nech \mathcal{A} je celulárny automat (Z^d, S, N, δ) . Potom pre vzdialenosť susedných buniek platí, že ak $\vec{z} = (z_1, \dots, z_d)$, $\|\vec{z}\|_1$ bude značiť $\sum_{i=1}^d |z_i|$, $\|\vec{z}\|_\infty$ bude značiť $\max\{|z_i| \mid i \in \{1, \dots, d\}\}$, d_1 , d_∞ vzdialenosť. Následne dostaneme:

- Von Neumannovo okolie: $N_{VN}\vec{z} = \{\vec{x} \mid \vec{x} \in Z^d \text{ a } d_1(\vec{z}, \vec{x}) \leq 1\}$ v danom poradí,
- Mooreovo okolie: $N_M\vec{z} = \{\vec{x} \mid \vec{x} \in Z^d \text{ a } d_\infty(\vec{z}, \vec{x}) \leq 1\}$ v danom poradí.

Ďalšie okolie, ktoré sa používa na jedno-dimenzinálnom celulárnom automate môžeme vidieť na obrázku 1.2. Toto okolie je charakteristické pre takzvaný *jednosmerný* (anglicky one-way) celulárny automat. Zahŕňa najbližšiu bunku naľavo a najbližšiu napravo (svetlo modré bunky) od hlavnej bunky c (tmavo modrá bunka).

²v literatúre nazývané taktiež ako binárne

³niektoré definície nezahŕňajú hlavnú bunku do okolia



Obr. 1.2: Okolie 1D CA s rádiusom $r = 1$

Rádius okolia r je definovaný ako vzdialenosť medzi hlavnou bunkou c , pre ktorú je okolie uvažované, a najvzdialenejšou bunkou z okolia. Takže pre vyššie popísaný jedno-dimenzionálny celulárny automat je rádius okolia $r = 1$ a počet buniek tvoriacich okolie $2r + 1 = 3$. Uvedený vzťah platí iba pre jedno-dimenzionálne symetrické okolie, v iných prípadoch môže byť pomer medzi rádiusom a počtom buniek tvoriacich okolie daný exponenciálne [15].

1.2.4 Pravidlá

Popisujú zmenu stavu buniek pre všetky možnosti konfigurácie celulárneho automatu. Funkciu, ktorá vypočíta nasledujúci stav bunky v ďalšom časovom kroku nazývame lokálna prechodová funkcia. Nasledujúci stav bunky závisí vždy od aktuálneho stavu bunky a stavov buniek v jej okolí [17]:

$$s(t + 1) = f(s(t), N_s(t))$$

Pravidlá je možné aj zoskupovať. Napríklad ak máme pravidlá ϕ_1 a ϕ_2 , potom ich zoskupením vznikne pravidlo $\bar{\phi} = \phi_1\phi_2$. Súbor pravidiel získaný týmto spôsobom je uzavretý v kompozícii.

Pokiaľ je pravidlo v kompozícii samo so sebou, potom bude pravidlo $\bar{\phi} = \phi\phi$ generovať striedavo vzor z časových krokov vzoru daného pravidlom ϕ . Pričom v kompozícii záleží na poradí pravidiel, takže $\phi_1\phi_2 \neq \phi_2\phi_1$.

Rozlišujeme tieto typy pravidiel:

- **”Legal”**: z nulových vstupných stavov nesmie vzniknúť nenulový stav.
- **”Totalistic”** (ϕ_{tot}): výstupný stav získame funkciou sumy všetkých hodnôt vstupných stavov.
- **”Outer-Totalistic”** ($\phi_{out-tot}$): základom je funkcia zohľadňujúca vstupnú hodnotu hlavnej bunky a sumu všetkých ostatných vstupov.
- **”Aditive”**: pravidlá patriace do špeciálnej triedy ϕ_{add} sú lineárnou funkciou vstupných hodnôt definovaných okolím.

Počet všetkých možných pravidiel závisí od počtu stavov (k) bunky a veľkosti okolia. Uvažujme elementárny jedno-dimenzionálny binárny celulárny automat. Okolie je dané rádiusom ($r = 1$), teda hlavná bunka a dve susedné, potom máme 3 vstupné hodnoty s dvomi ($k = 2$) možnými stavmi $\{0, 1\}$. Počet možností vstupu je $2^3 = 8$ a počet všetkých možných pravidiel $2^8 = 256$ [12].

1.3 Klasifikácia celulárnych automatov

V nasledujúcej sekcii si ukážeme rozdelenie celulárnych automatov do tried na základe ich chovania podľa klasifikácie definovanej Stephenom Wolframom. Tieto triedy sú číslované na základe zvyšujúcej sa komplexnosti, pričom každá má isté charakteristické rysy.

Trieda	Popis triedy
1.trieda	Chovanie je veľmi jednoduché a skoro všetky počiatočné podmienky vedú k rovnakému ustálenému konečnému stavu.
2.trieda	Vyskytuje sa tu množstvo odlišných možných konečných stavov ale všetky sa skladajú z množiny istých jednoduchých štruktúr, ktoré sa už ďalej nemenia alebo sa opakujú v krátkej perióde.
3.trieda	Chovanie je podstatne zložitejšie, z veľkej časti chaotické a neperiodické.
4.trieda	Vo štvrtej triede je chovanie kombináciou organizovaného a chaotického. V rôznych oblastiach vznikajú lokalizované štruktúry, ktoré sa pohybujú a vzájomne ovplyvňujú značne komplikovaným spôsobom (napríklad Life).

V každej obecnej klasifikácii sa nevyhnutne nachádzajú hraničné prípady, ktoré môžeme podľa jednej vlastnosti priradiť do nejakej triedy a podľa ďalšej vlastnosti do triedy inej. Výnimkou nie sú ani celulárne automaty, a preto existujú vzácne hraničné prípady, ktoré nemožno jednoznačne priradiť do jednej z popísaných tried. Ale takéto pravidlá nie sú vôbec bežné, a vo väčšine prípadov chovanie CA spadá priamo do jednej zo štyroch tried.

Podstatné je, že v triedach 1 a 2 sa systém rýchlo ustály v stavoch, v ktorých už ďalej nevykonáva takmer žiadnu aktivitu. Na rozdiel od nich systémy z tretej triedy naďalej menia stavy buniek v každom kroku a túto vysokú aktivitu vykazujú donekonečna. Systémy zo štvrtej triedy sú kombináciou tried 1 a 2, pretože aktivita ktorú vykazujú nikdy úplne nezanikne, ako v triede 2, ale ani nevykazujú takú vysokú úroveň aktivity ako systémy patriace do tretej triedy. Preto pri systémoch spadajúcich do štvrtej triedy môžeme váhať či majú vlastnosti triedy druhej alebo tretej, ale v skutočnosti ani do jednej z týchto tried nepasujú úplne [27].

1.4 Využitie CA na simuláciu požiaru

Oheň môže znamenať pre les veľké nebezpečenstvo lebo poškodzuje stromy aj celé porasty nie iba mechanicky ale aj fyziologicky. Okrem stromov ničí aj ostatné zložky, ktoré sa nachádzajú v lesnom ekosystéme – pôdu, opadnuté listie ako aj všetky rastliny a živočíchy. V niektorých krajinách je oheň neoddeliteľnou súčasťou pri obnove lesa, ale väčšina veľkých lesných požiarov zanecháva ohromné škody v ekosystéme, prípadne straty na majetku a životoch [14].

Predikcia správania lesných požiarov je dôležitým prvkom pri boji proti veľkým lesným požiarom, ako aj pri skúmaní rôznych vplyvov na vznik požiaru. Celulárne automaty sú vhodným a často používaným prostriedkom na simulovanie lesného požiaru.

Koncepčne sa predikčné modely šírenia lesného požiaru postavené na CA rozdeľujú do dvoch kategórií:

- **Stochastické:** alebo tiež empirické, sú modely, ktoré predpovedajú najpravdepodobnejšie správanie požiaru na základe údajov získaných z laboratórií alebo pokusných požiarov.
- **Deterministické:** nazývané tiež aj ako semi-empirické alebo matematické. Narozdiel od stochastických je správanie požiaru predpovedané podľa rôznych fyzikálnych zákonov.

Väčšina modelov spadá do kategórie deterministických, ktoré zahŕňajú fyzikálne mechanizmy pre šírenie požiaru. Jeden z prvých modelov tohto typu bol Rothermelov model z roku 1972. Najpopulárnejší deterministický model je FARSITE [9] z roku 1999, ktorého autorom je Mark Finney. Ďalším dôležitým modelom v tejto kategórii je model PROMETHEUS [22] z roku 2006. Žiadny z týchto modelov neumožňuje stochastický výstup, pretože pri akýchkoľvek vstupných podmienkach dostaneme vždy deterministický výsledok. Aj keď takéto modely môžu dávať veľmi realistické výsledky, sú v nich zanedbané stochastické javy ako napríklad odletovanie iskier zo stromov.

V stochastických modeloch sú vo funkcii šírenia požiaru zahrnuté viaceré premenné hodnoty a počíta sa s náhodnými javmi, ako aj s pravdepodobnosťou výskytu rôznych udalostí. Ak zahrnieme do modelu mechanizmus odletovania iskier, môžeme dostať realistickejšie výsledky simulácie. Veľkou výhodou je, že pri odletovaní iskier je možné aby sa oheň šírila aj cez prekážky (napr. rieka), čím sa zvyšuje miera použiteľnosti modelu – validita. Príkladom stochastického modelu je model Stauffera a Aharonyho z roku 1992 [5].

Najdôležitejšie parametre, ktoré by mali byť zahrnuté v lokálnej prechodovej funkcii modelu pre predikciu šírenia požiaru sú:

- sila a smer vetra
- rôzna horľavosť jednotlivých buniek (pri nehomogénnych lesoch)
- členitosť horského povrchu

V horľavosti buniek je väčšinou zakomponovaná tiež teplota ovzdušia a vlhkosť vzduchu. Niektoré modely počítajú aj so spomínaným odletovaním iskier alebo padaním horiacich stromov, tieto mechanizmy sú ale čisto empirické.

Kapitola 2

Teoretický rozbor použitého modelu

V tejto práci budeme uvažovať novší model pre šírenie požiaru z roku 2007 z vedeckého článku [8], ktorý vychádza z modelu publikovaného v článku [13] z roku 1997. Daný model bol ešte doplnený o stochastický proces odletovania iskier. Jedná sa o matematický model založený na dvoj-dimenzionálnom CA so šesťuholníkovou mriežkou. Daný model neobsahuje výpočet jednotlivých parametrov a koeficientov¹, tie budú preto popísané až v nasledujúcej kapitole.

V nasledujúcej kapitole bude podrobnejšie popísaná funkčnosť daného modelu vrátane všetkých použitých vzťahov a lokálnej prechodovej funkcie. V niektorých prípadoch nieje kvôli prehľadnosti popísané detailné odvodenie konkrétnych vzťahov, pretože tieto výpočty je možné nájsť priamo v článku [8], ktorý prezentuje daný model.

2.1 Definovanie základných vlastností použitého CA

Ako bolo spomenuté, jedná sa o 2D CA tvorený bunkami z identických pravidelných šesťuholníkov. V ďalšom texte budeme vychádzať z definície dvoj-dimenzionálneho celúrného automatu uvedenej v definícii 2.1.1.

Definícia 2.1.1. 2-dimenzionálny celúrný automat je štvorica $\mathcal{A} = (C, S, V, f)$, kde:

C je bunečný priestor formovaný dvojdimenzionálnym polom o veľkosti $r \times c$, pričom pre indexy pola platí: $\{(a, b) \mid 0 \leq a < r, 0 \leq b < c\}$,

S je konečná množina všetkých stavov \mathcal{A} , pričom stav bunky (a, b) v čase t značíme ako s_{ab}^t ,

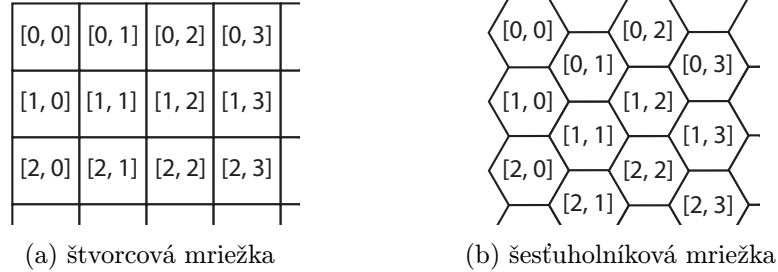
V je konečná, usporiadaná podmnožina $V \subset \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, $|V| = m$, a pre každú bunku (a, b) je jej okolie $V_{(a,b)}$ definované ako usporiadaná množina m buniek nasledovne:

$$V_{(a,b)} = \{(a + \alpha_1, b + \beta_1), \dots, (a + \alpha_m, b + \beta_m) : (\alpha_k, \beta_k) \in V\},$$

$f : S^{m+1} \mapsto S$ je lokálna prechodová funkcia, pomocou ktorej podľa $m + 1$ premenných (stavy okolitých buniek a stav aktuálnej bunky) počítame pre každú bunku jej nasledujúci stav v čase $t + 1$.

¹Hodnoty koeficientov udávajú do akej miery je ovplyvnená rýchlosť šírenia požiaru jednotlivými faktormi ako napríklad vietor, členitosť terénu a horľavosť povrchu.

Na obrázku 2.1 môžeme vidieť rozdiel pri indexovaní bunečného priestoru tvoreného hexagonálnou mriežkou 2.1b oproti indexovaniu pri použití klasickej štvorcovej mriežky 2.1a. Použitie priestoru so zložitejšou šesťuholníkovou reprezentáciou buniek nám umožní presnejšie vykreslenie kruhového tvaru vyhorenej plochy.

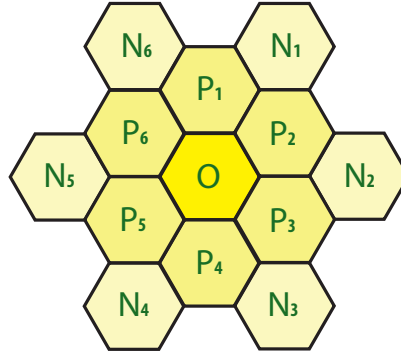


Obr. 2.1: Indexovanie buniek

V našom prípade budeme kvôli väčšej presnosti uvažovať rozšírené 13-okolie bunky $O = (a, b)$ zobrazené na obrázku 2.2 dané množinou:

$$V_O = \{O, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6\} \quad (2.1)$$

Ako je vidieť z daného vzťahu, v našej definícii počítame s tým, že aj hlavná bunka O patrí do okolia V_O (v literatúre sa vyskytujú aj prípady kedy nieje hlavná bunka definovaná ako súčasť okolia). Podľa toho, či bunka susedí s bunkou O priamo (tj. nachádza sa hneď vedľa nej), alebo nepriamo rozoznávame v modeli dva typy susedných buniek bunky O . Priamo susediace bunky s bunkou O sú dané množinou $V_p = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\}$ a vzdialenejšie, nepriamo susediace bunky budú označované ako $V_n = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6\}$.



Obr. 2.2: Okolie bunky O

Každá vzdialená nepriamo susediaca bunka ďalej susedí s dvomi priamo susediacimi bunkami, ktoré sa nachádzajú medzi ňou a bunkou O . Napríklad ako môžeme vidieť na obrázku 2.2, medzi nepriamo susediacou bunkou N_1 a bunkou O sa nachádzajú priamo susediace bunky P_1 a P_2 , ktoré sú zároveň priradené k bunke N_1 . V takom prípade ak platí, že $(\alpha, \beta) \in V_n$, tak priradené bunky k bunke $(a + \alpha, b + \beta)$ sú označované ako $(a + \alpha^+, b + \beta^+)$ a $(a + \alpha^-, b + \beta^-)$.

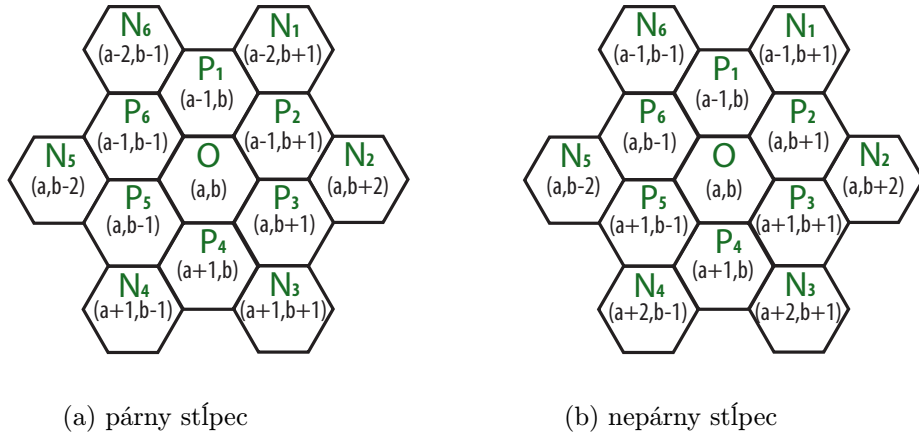
Na základe indexovania uvedeného na obrázku 2.1b musíme rozoznávať dva spôsoby výpočtu indexov okolitých buniek podľa toho či sa nachádza hlavná bunka O , pre ktorú počítame okolie, v párnom alebo nepárnom stĺpci.

Predpokladajme bunku $O = (a, b)$ s okolím daným vzťahom uvedeným v 2.1. Ak je jej súradnica b párne číslo, nachádza sa v párnom stĺpci (viz obrázok 2.3a), potom bude vo všeobecnosti jej okolie definované nasledujúcim vzťahom:

$$V_{(a,b)}^{par} = \{(a, b), (a-1, b), (a-1, b+1), (a, b+1), (a+1, b), (a, b-1), (a-1, b-1), (a-2, b-1), (a-2, b+1), (a, b+2), (a+1, b+1), (a+1, b-1), (a, b-2)\}. \quad (2.2)$$

Naopak ak je súradnica b nepárna (viz obrázok 2.3b), tak je okolie bunky O dané vzťahom:

$$V_{(a,b)}^{nep} = \{(a, b), (a-1, b), (a, b+1), (a+1, b+1), (a+1, b), (a+1, b-1), (a, b-1), (a-1, b-1), (a-1, b+1), (a, b+2), (a+2, b+1), (a+2, b-1), (a, b-2)\}. \quad (2.3)$$



Obr. 2.3: Indexovanie buniek v hexagonálnej mriežke

Pod pojmom konfigurácia celulárneho automatu rozumieme aktuálne hodnoty stavov všetkých buniek v bunečnom priestore C (v našom prípade dvoj-dimenzionálnom) celulárneho automatu. Konfiguráciu bunečného automatu v čase t potom môžeme zapísať ako $C^{(t)} = \{s_{ij}^{(t)} \mid 0 \leq i < r, 0 \leq j < c\}$. Konfigurácia v čase $t = 0$ sa označuje ako počiatočná konfigurácia celulárneho automatu a označuje sa ako $C^{(0)}$.

Konfigurácia celulárneho automatu sa mení deterministicky v diskkrétnej časovej množine. Stav buniek v nasledujúcich časových krokoch sa počítajú pomocou lokálnej prechodovej funkcie $f : S^{13} \mapsto S$. Stav bunky $O = (a, b)$ v čase $t + 1$ závisí od 13-tich premenných lokálnej prechodovej funkcie f , daných jej okolím V_O . Sú to aktuálny stav bunky (a, b) a stavy dvanástich susedných buniek v čase t .

$$s_{ab}^{(t+1)} = f(s_{a,b}^t, s_{a+\alpha_1, b+\beta_1}^{(t)}, \dots, s_{a+\alpha_{12}, b+\beta_{12}}^{(t)}) \quad (2.4)$$

V každom celulárnom automate musia byť definované okrajové podmienky, ktoré ohraňujú bunečný priestor. V tomto modeli uvažujeme nulové okrajové podmienky, zapísané nasledovne:

$$\text{ak } (a, b) \notin \{(u, v) \mid 0 \leq u < r, 0 \leq v < c\} \Rightarrow s_{a,b}^{(t)} = 0. \quad (2.5)$$

Takže všetky bunky, ktoré sa nachádzajú mimo definovaný bunečný priestor daný dvojrozmerným poľom budú mať stav $s_{a,b}^{(t)} = 0$ počas celej doby simulácie.

2.2 Popis modelu pre šírenie požiaru

V tejto sekcii si podrobnejšie popíšeme niektoré aspekty nami zvoleného modelu pre predpoveď šírenia lesného požiaru. V CA je oblasť lesa interpretovaná bunečným priestorom rozdeleným do buniek tvaru pravidelného šesťuholníka s dĺžkou strany a .

V modeli uvažujeme nasledujúcu diskretnú množinu všetkých možných stavov $S = \{0, 0; 0, 1; \dots; 1, 0\}$, pričom každá bunka môže nadobúdať jeden z jedenástich možných stavov. Pokiaľ je stav bunky (a, b) v čase t rovný nule ($s_{ab}^{(t)} = 0$), znamená to, že daná bunka v čase t nehorí ani nieje zhorená. Ak platí, že $0 < s_{ab}^{(t)} < 1$ znamená to, že bunka (a, b) je v čase t čiastočne zhorená, pričom jej stav odpovedá pomeru vyhorenej oblasti bunky. A nakoniec ak je $s_{ab}^{(t)} = 1$, potom je plocha reprezentovaná bunkou (a, b) v čase t úplne zhorená.

Pretože výsledkom lokálnej prechodovej funkcie je reálne číslo, je potrebná diskretizačná funkcia. Tá má za úlohu výslednú hodnotu transformovať na hodnotu z konečnej množiny stavov. Je možné, že lokálna prechodová funkcia vráti hodnotu $s_{ab}^{(t)} > 1$, vtedy bude stav bunky (a, b) v čase t rovný práve 1.

Špeciálnym typom sú nehorľavé bunky, ktoré reprezentujú napríklad skaly, vodu a pod. Takéto bunky majú stav $s_{ab}^{(t)} = 0$ pre každé t , takže počas celej simulácie.

Stav bunky (a, b) v čase t , ktorý zodpovedá podielu vyhorenej časti bunky, je definovaný nasledovne:

$$s_{ab}^{(t)} = \frac{\text{vyhorená plocha bunky } (a, b) \text{ v čase } t}{\text{celková plocha bunky } (a, b)}, \quad (2.6)$$

kde celkovú plochu bunky tvaru pravidelného šesťuholníka získame podľa vzorca $3\sqrt{3}a^2/2$.

Stav bunky (a, b) v čase $t + 1$ sa počíta z aktuálneho stavu bunky (a, b) a zo stavov buniek v jej okolí v čase t ako môžeme vidieť v nasledujúcej rovnici:

$$s_{ab}^{(t+1)} = g \left(s_{ab}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_p} \mu_{\alpha\beta}^{(a,b)} s_{a+\alpha, b+\beta}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_n} \mu_{\alpha\beta}^{(a,b)} s_{a+\alpha, b+\beta}^{(t)} \right), \quad (2.7)$$

kde parameter $\mu_{\alpha\beta}^{(a,b)} \in \mathbb{R}$ zobrazuje vplyv fyzikálnych veličín. Diskretizačná funkcia g zabezpečuje aby výsledný stav bol z konečnej množiny stavov S , a je daná vzťahom $g : [0, 1] \rightarrow S$, $x \mapsto g(x) = [10x]/10$, kde $[m]$ zodpovedá najbližšiemu číslu typu integer m .

Parameter $\mu_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ sa skladá z viacerých veličín, ako to vyjadruje nasledujúci vzťah

$$\mu_{\alpha\beta}^{(a,b)} = \omega_{\alpha\beta}^{(a,b)} \cdot h_{\alpha\beta}^{(a,b)} \cdot r_{\alpha\beta}^{(a,b)}, \quad (2.8)$$

kde $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ reprezentuje vplyv vetra susednej bunky $(a + \alpha, b + \beta)$ na bunku (a, b) .

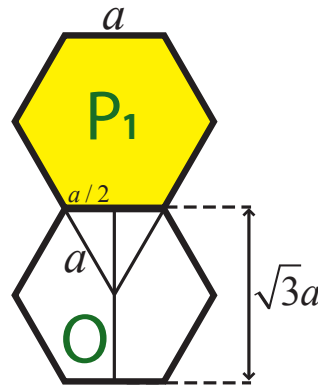
$$W_{(a,b)} = \{\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}, (\alpha, \beta) \in V\}, \omega_{\alpha\beta}^{(a,b)} > 0 \quad (2.9)$$

Koeficient $h_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ reprezentuje vplyv výškového rozdielu (členitosť horského povrchu) daného vzťahom $H_{(a,b)} - H_{(a-\alpha, b-\beta)}$, kde $H_{(a,b)}$ je výška bunky (a, b) . Predpokladáme, že celá plocha jednej bunky sa nachádza v jednej výške. A nakoniec koeficient $r_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ zahŕňa vplyv rôznej horľavosti buniek, pričom horľavosť bunky (a, b) označujeme ako $R_{(a,b)}$.

2.3 Veľkosť diskretného časového kroku

Pretože konfigurácia celulárneho automatu sa mení v diskretnéj časovej množine je potrebné zvoliť veľkosť časového kroku \tilde{t} . V nami uvažovanom modeli je veľkosť časového kroku rovná času potrebnému na zhorenie hlavnej bunky O od práve jednej priamo susediacej horiacej bunky. Rýchlosť šírenia požiaru v bunke (a, b) , $R_{(a,b)}$, určuje čas potrebný na celkové zhorenie bunky v závislosti na jej horľavosti. Preto ak bunka (a, b) predstavuje nehorľavú oblasť, potom $R_{(a,b)} = 0$ a $s_{ab} = 0$ počas celej simulácie.

V prípade, že by bol nami modelovaný les homogénny, tak pre všetky bunky CA platí: $R_{ab} = R \mid 0 \leq a < r, 0 \leq b < c$. Inými slovami by mali všetky bunky rovnakú horľavosť R . Potom by v prípade, že je v okolí jediná horiaca bunka, a to práve priamo susediaca bunka P_1 , bol čas potrebný na kompletne zhorenie bunky O daný ako: $\tilde{t} = \sqrt{3}a/R$. Danú problematiku znázorňuje obrázok 2.4, kde je zobrazená dĺžka hrany a a najmenší priemer šesťuholníka $\sqrt{3}a$. Následkom toho by bolo, že by sa stav bunky (a, b) zmenil z $s_{ab}^{(t)} = 0$ po jednom časovom kroku na $s_{ab}^{(t+1)} = 1$.



Obr. 2.4: Výpočet diskretného časového kroku – geometria buniek

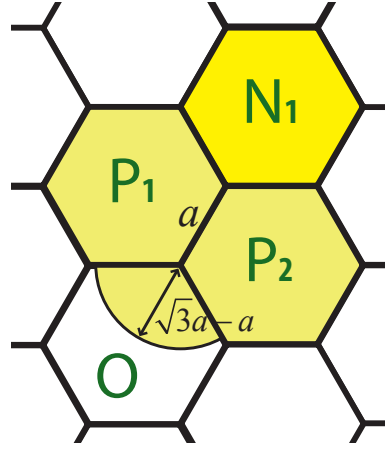
V našom modeli budeme ale uvažovať iba nehomogénny les pre ktorý vypočítame časový krok nasledovne:

$$\tilde{t} = \sqrt{3} \frac{a}{R}, \quad (2.10)$$

kde a je veľkosť strany šesťuholníka reprezentujúceho bunku a parameter R je maximálna horľavosť bunky vyskytujúca sa v systéme, definovaná nasledovne:

$$R = \max\{R_{(a,b)} \mid 0 \leq a < r, 0 \leq b < c\}. \quad (2.11)$$

V situácii, že by v čase t v okolí bunky O bola jediná horiaca bunka, a to práve nepriamo susediaca, povedzme N_1 , a samotná bunka O by mala stav $s_{ab}^{(t)} = 0$, potom $0 < s_{ab}^{(t+1)} < 1$. Situácia je znázornená na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Šírenie požiaru z nepriamo susediacej bunky N_1 na bunku O

Uvažujme situáciu, že vzdialenosť, ktorú prejde oheň za časový krok \tilde{t} rýchlosťou R je rovná $\sqrt{3}a$. Potom z poznatkov, že oheň sa šíri kruhovo vieme, že polomer kruhového úseku, ktorý predstavuje vyhorenú časť bunky O je $\sqrt{3}a - a$. Zhorenú plochu bunky O v čase $t+1$ vypočítame s použitím vzorca na výpočet kruhového výseku.

Takže ak je v okolí bunky (a, b) jedinou horiacou bunkou nepriamo susediaca bunka, a tá je úplne zhorená, potom platí, že stav tejto bunky v čase $t+1$ bude rovný podielu vyhorenej plochy a celej plochy bunky:

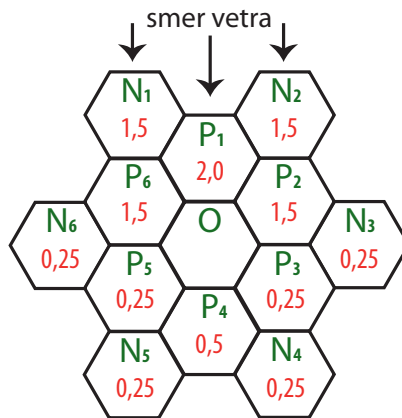
$$s_{ab}^{(t+1)} = \frac{\frac{4-2\sqrt{3}}{3}\pi a^2}{\frac{3\sqrt{3}}{2}a^2} = \frac{8\sqrt{3}-12}{27}\pi \approx 0,216. \quad (2.12)$$

Výsledná hodnota je 0,216, takže po zaokrúhlení tejto hodnoty diskretizačnou funkciou získame stav $s_{ab}^{(t+1)} = 0,2$.

2.4 Model vetra

Jedným z najdôležitejších faktorov pri šírení ohňa je vietor, preto je v modeli zahrnutý smer ako aj sila vetra. Budeme vychádzať zo vzťahu 2.9 uvedeného v sekcii 2.2. Ak na bunku $O = (a, b)$ nefúka žiadny vietor, potom platí, že $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)} = 1$ pre každé $(\alpha, \beta) \in V$.

V prípade, že fúka vietor smerom zo severu na západ, tak koeficienty $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ buniek nachádzajúcich sa severne od bunky O musia mať väčšie hodnoty ako všetky ostatné. Túto situáciu zobrazuje obrázok 2.6.



Obr. 2.6: Model vetra – príklad hodnôt koeficientu $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}$

Obrázok slúži ako príklad riešenia vplyvu vetra, červené čísla na obrázku zobrazujú koeficienty $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}$, ktoré priamo vplývajú na rýchlosť šírenia požiaru (resp. ju násobia) zo susedných buniek na hlavnú bunku O , tak ako to môžeme vidieť vo vzťahu 2.8.

V tomto prípade obrázok znázorňuje smer vetra zo severu na juh, a jeho sila zapríčiňuje, že v tomto smere sa požiar šíri dvojnásobnou rýchlosťou. V skutočnosti ale jediná bunka, ktorá sa nachádza priamo v tomto smere vetra je P_1 a preto má ako jediná koeficient $\omega_{P_1}^O = 2,0$. Pre ostatné bunky, ktoré sa nachádzajú severne od bunky O platí $1,0 < \omega_{\alpha\beta}^{(a,b)} < 2,0$. To znamená, že vietor urýchľuje šírenie požiaru na bunku O , ale menej ako v prípade bunky P_1 , lebo šírenie požiaru neprebíha priamo v smere vetra. Keďže požiar sa v protismere vetra šíri výrazne pomalšie, tak pre bunky, ktoré sa nachádzajú južne od bunky O potom platí $0,0 < \omega_{\alpha\beta}^{(a,b)} < 1,0$.

Dané koeficienty $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ boli zvolené iba pre demonštráciu vplyvu vetra na šírenie požiaru. Mechanizmus výpočtu presných hodnôt tohoto koeficientu v závislosti na smere a rýchlosti vetra bude detailne popísaný v kapitole 3.

2.5 Vplyv členitosti horského povrchu

Výškové rozdiely medzi jednotlivými bunkami majú taktiež výrazný vplyv na rýchlosť šírenia lesného požiaru. Vplyv výškového rozdielu medzi priamo susediacimi bunkami $(a+\alpha, b+\beta)$ a bunkou $O = (a, b)$ je daný koeficientom $h_{\alpha,\beta}^{(a,b)}$, ktorého hodnota závisí od výškového rozdielu medzi každým párom uvažovaných buniek $h_{\alpha,\beta}^{(a,b)} = \phi_s(H_{(a,b)} - H_{(a+\alpha, b+\beta)})$.

Pre funkciu $y = \phi_s(x)$, kde x je výškový rozdiel medzi bunkami, platia nasledujúce pravidlá:

1. Ak je $x > 0$, potom $\phi_s(x) > 0$.
2. Ak je $x = 0$, potom $\phi_s(x) = 1$.

3. Ak je $x < 0$, potom $0 < \phi_s(x) < 1$.

Z prvej podmienky vyplýva, že ak je výška bunky $O = (a, b)$ väčšia ako výška okolia, platí $H_{(a,b)} > H_{(a+\alpha, b+\beta)}$, tak sa zvyšuje rýchlosť šírenia ohňa na bunku O .

Druhé pravidlo znamená, že ak je bunka O v rovnakej výške ako okolité bunky, platí $H_{(a,b)} = H_{(a+\alpha, b+\beta)}$, potom nemá výška žiadny vplyv na rýchlosť šírenia požiaru.

Nakoniec z tretieho pravidla je jasné, že ak je výška bunky O menšia ako výška okolitých buniek, platí $H_{(a,b)} < H_{(a+\alpha, b+\beta)}$, potom sa znižuje rýchlosť šírenia požiaru na bunku O .

Vplyv výškového rozdielu vzdialenejších nepriamo susediacich buniek na bunku O zahŕňa výškový rozdiel priamo susediacich buniek ktoré sa nachádzajú medzi nimi. Napríklad vplyv výškového rozdielu medzi bunkami O a jej nepriamo susediacou bunkou N_1 bude vypočítaný nasledovne:

$$h_{N_1}^O = \frac{1}{4} [\phi_s(H_O - P_1) + \phi_s(H_O - P_2) + \phi_s(P_1 - N_1) + \phi_s(P_2 - N_1)]. \quad (2.13)$$

Pokiaľ by sme zanedbali členitosť horského povrchu a výškové rozdiely medzi bunkami, alebo uvažovali plochú oblasť lesa, tak platí $h_{\alpha, \beta}^{(a,b)} = 1$ pre každú bunku (a, b) a všetky $(\alpha, \beta) \in V$.

Presný mechanizmus funkcie $\phi_s(x)$, ktorej výsledkom je koeficient $h_{\alpha, \beta}^{(a,b)}$, a ktorá určuje veľkosť vplyvu výškového rozdielu buniek na rýchlosť šírenia požiaru bude riešený v kapitole 3.

2.6 Rýchlosť šírenia požiaru

Ak uvažujeme nehomogénny les, potom parameter R predstavuje maximálnu rýchlosť šírenia požiaru, tak ako je to uvedené vo vzťahu 2.11. Potom rýchlosť šírenia požiaru v bunke $O = (a, b)$ je $R_O \leq R$. Hlavným cieľom tejto sekcie je zobrazíť vplyv rôznej horlavosti susedných buniek, ktorá je daná parametrom $r_{\alpha\beta}^{(a,b)}$.

V prípade, že v okolí v čase t nehorí ani jedna bunka, okrem práve jednej priamo susediacej bunky s bunkou O (napríklad P_1), potom oblasť, ktorú prejde oheň rýchlosťou R_O za dobu jedného časového kroku \tilde{t} je daná nasledujúcim vzťahom:

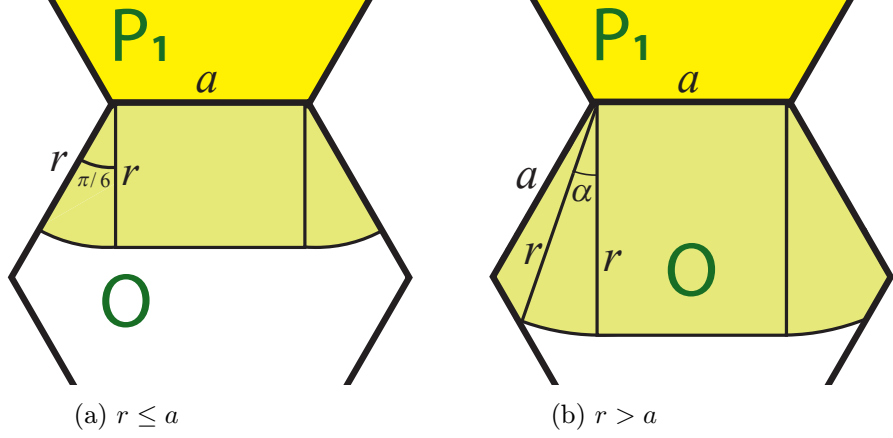
$$r = R_O \tilde{t} = \sqrt{3} \frac{R_O}{R} a \quad (2.14)$$

Následkom toho potom rozlišujeme dva prípady, ktoré sú znázornené na obrázku 2.7.

Prvý prípad nastáva ak je vzdialenosť, ktorú prejde požiar (r) menšia alebo rovná veľkosti strany šesť-uholníka (a) tvoriaceho bunku, platí $r \leq a$. V tomto prípade veľkosť zhorenej plochy bunky O vypočítame pomocou vzťahov na výpočet obsahu kruhového výseku a obdĺžnika (viď obrázok 2.7a).

V opačnom prípade, platí $r > a$, vypočítame zhorenú plochu bunky O pomocou vzťahov na výpočet obsahu trojuholníka, kruhového výseku a obdĺžnika tak, ako je to uvedené na obrázku 2.7b.

1. Ak platí $r \leq a$ (obr. 2.7a), potom $\sqrt{3} \frac{R_O}{R} a \leq a$, a $\frac{R_O}{R} \leq \frac{\sqrt{3}}{3} \approx 0,57735$. Ak vieme vypočítať zhorenú oblasť bunky O po časovom kroku \tilde{t} , tak vieme následne vypočítať aj časť (podiel) bunky, ktorá za tento jeden časový krok zhorí:



Obr. 2.7: Šírenie požiaru z priamo susediacej bunky

$$r_{P_1}^O = \frac{(\sqrt{3} + \frac{\pi}{2} \frac{R_O}{R}) \frac{R_O}{R} a^2}{\frac{3}{2} \sqrt{3} a^2} = \frac{2\sqrt{3}}{9} \left(\sqrt{3} + \frac{\pi}{2} \frac{R_O}{R} \right) \frac{R_O}{R}. \quad (2.15)$$

2. Ak platí $r > a$ (obr. 2.7b), tak $a < \sqrt{3} \frac{R_O}{R} a$, a $0,57735 \approx \frac{\sqrt{3}}{3} < \frac{R_O}{R} \leq 1$. Potom je zhorená časť bunky $O = (a, b)$ po časovom kroku \tilde{t} daná vzťahom:

$$r_{P_1}^O = \frac{\left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right) + \sqrt{3} \alpha \frac{R_O}{R} \right] \sqrt{3} \frac{R_O}{R} a^2}{\frac{3}{2} \sqrt{3} a^2} = \frac{2}{3} \left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right) \right] \frac{R_O}{R} \frac{2\sqrt{3}}{3} \alpha \frac{R_O^2}{R^2}, \quad (2.16)$$

kde

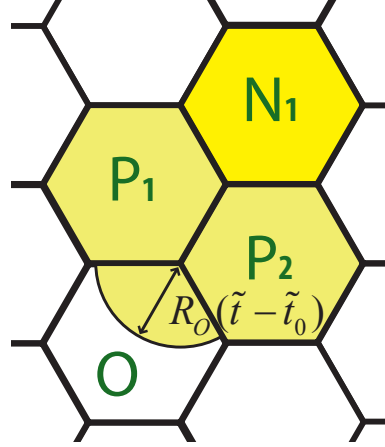
$$\alpha = \frac{\pi}{6} - \arccos\left(\frac{\sqrt{3}}{4} \frac{R}{R_O} + \frac{\sqrt{3}}{12} \sqrt{12 - 3 \frac{R^2}{R_O^2}}\right), \quad 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{6}. \quad (2.17)$$

V prípade, ak by sa jednalo o homogénny les, tak $R_{ab} = R$ pre každú bunku (a, b) a

$$\alpha = \frac{\pi}{6} - \arccos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0, \quad (2.18)$$

výsledkom čoho je, že $r_{P_1}^O = 1$. To odpovedá faktu, že veľkosť diskrétného časového kroku \tilde{t} sme zvolili tak, aby odpovedala času potrebnému na zhorenie hlavnej bunky O od práve jednej priamo susediacej bunky (viď sekcia 2.3).

Naopak pokiaľ uvažujeme situáciu znázornenú na obrázku 2.8, kedy v okolí horí práve jedna bunka a tá je nepriamo susediaca (konkrétne v našom prípade N_1), potom po dobu



Obr. 2.8: Šírenie požiaru z nepriamo susediacej bunky N_1 na bunku O

časového kroku \tilde{t} sa oheň šíri po hranici danej priamo susediacimi bunkami P_1 a P_2 až na hlavnú bunku O . Oheň prejde vzdialenosť danú hranicou medzi bunkami P_1 a P_2 za čas $\tilde{t}_0 = L/\max\{R_{P_1}, R_{P_2}\}$.

Potom vzdialenosť prejdenú ohňom cez bunku O vypočítame nasledovne:

$$R_O(\tilde{t} - \tilde{t}_0) = \left(\frac{\sqrt{3}}{R} - \frac{1}{\max\{R_{P_1}, R_{P_2}\}} \right) R_O a . \quad (2.19)$$

Obsah vyhorenej plochy z bunky O vypočítame pomocou vzorca na obsah kruhového výseku pričom polomer bude $R_O(\tilde{t} - \tilde{t}_0)$. A podiel vyhorenej časti bunky O za časový krok \tilde{t} získame tak, že obsah vyhorenej časti bunky vydělíme obsahom celkovej plochy bunky:

$$r_{N_1}^O = \frac{\frac{\pi}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{R} - \frac{1}{\max\{R_{P_1}, R_{P_2}\}} \right)^2 R_O^2 a^2}{\frac{3}{2} \sqrt{3} a^2} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{27} \left(\sqrt{3} \frac{R_O}{R} - \frac{R_O}{\max\{R_{P_1}, R_{P_2}\}} \right)^2 . \quad (2.20)$$

Ak by sme zase uvažovali iba homogénny les, tak platí:

$$r_{N_1}^O = \frac{2\pi\sqrt{3}}{27} (\sqrt{3} - 1)^2 = \frac{8\sqrt{3} - 12}{27} = \lambda \quad (2.21)$$

2.7 Lokálna prechodová funkcia

Nakoniec, keď si zhrnieme všetky popísané fakty, tak lokálna prechodová funkcia na predpoved šírenia požiaru v šesťuholníkovej mriežke celulárneho automatu, ktorá zahŕňa diskretizačnú funkciu s patričnými pravidlami, bude vypadať nasledovne:

$$s_{ab}^{t+1} = \frac{1}{10} \left[10 \sum_{(\alpha, \beta) \in V} \omega_{\alpha\beta}^{(a,b)} h_{\alpha\beta}^{(a,b)} r_{\alpha\beta}^{(a,b)} s_{a+\alpha, b+\beta}^{(t)} \right] \quad (2.22)$$

Vplyv modelu vetra predstavuje zahrnutý parameter $\omega_{\alpha\beta}^{(a,b)}$, ktorý bol popísaný v sekcii 2.4.

Parameter $h_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ predstavuje v lokálnej prechodovej funkcii vplyv výškového rozdielu buniek (viď sekcia 2.5). Podľa toho či sa jedná o priamo susediacu bunku alebo nepriamo susediacu bunku rozlišujeme nasledovné dva prípady:

1. Pokiaľ sa jedná o priamo susediacu bunku, platí $(\alpha, \beta) \in V_p$, tak použijeme vzorec:

$$h_{\alpha\beta}^{(a,b)} = \phi_s(H_{(a,b)} - H_{(a+\alpha, b+\beta)}).$$

2. Naopak pre nepriamo susediacu bunku, $(\alpha, \beta) \in V_n$, výpočet zahŕňa aj dve priamo susediace bunky, ktoré sa nachádzajú medzi hlavnou bunkou O a danou nepriamo susediacou bunkou pre ktorú je koeficient $h_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ počítaný. Výpočet vypadá nasledovne:

$$h_{\alpha\beta}^{(a,b)} = \frac{1}{4}[\phi_s(H_{(a,b)} - H_{(a+\alpha^+, b+\beta^+)}) + \phi_s(H_{(a+\alpha^+, b+\beta^+)} - H_{(a+\alpha, b+\beta)}) + \phi_s(H_{(a,b)} - H_{(a+\alpha^-, b+\beta^-)}) + \phi_s(H_{(a+\alpha^-, b+\beta^-)} - H_{(a+\alpha, b+\beta)})].$$

Posledný parameter $r_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ zahrňuje rýchlosť šírenia požiaru v závislosti od rôznej horľavosti buniek. Rýchlosť šírenia požiaru bola popísaná v sekcii 2.6 a pre výpočet koeficientu $r_{\alpha\beta}^{(a,b)}$ sú definované nasledujúce vzťahy:

$$r_{\alpha\beta}^{(a,b)} = \begin{cases} \frac{2\pi\sqrt{3}}{27} \left(\sqrt{3} \frac{R_{(a,b)}}{R} - \frac{R_{(a,b)}}{\max\{R_{(a+\alpha^+, b+\beta^+)}, R_{(a+\alpha^-, b+\beta^-)}\}} \right)^2, & \text{ak } (\alpha, \beta) \in V_n, \\ \frac{2\sqrt{3}R_{(a,b)}}{9R} \left(\sqrt{3} + \frac{\pi}{2} \frac{R_{(a,b)}}{R} \right), & \text{ak } (\alpha, \beta) \in V_p \text{ a } R \geq \sqrt{3}R_{(a,b)}, \\ \frac{2R_{(a,b)}}{3R} \left(1 + \sin\left(\frac{\pi}{6} - \alpha\right) + \frac{\sqrt{3}\alpha R_{(a,b)}}{R} \right), & \text{pre ostatné prípady} \end{cases}$$

kde

$$\alpha = \frac{\pi}{6} - \arccos\left(\frac{\sqrt{3}}{4} \frac{R}{R_{(a,b)}} + \frac{\sqrt{3}}{12} \sqrt{12 - 3 \frac{R^2}{R_{(a,b)}^2}}\right).$$

Pokiaľ by sme zanedbali model vetra a členitosť horského povrchu, a uvažovali by sme homogénny les (rovnakú horľavosť všetkých buniek – $R_{ab} = R$), potom by lokálna prechodová funkcia vypadala nasledovne:

$$s_{ab}^{(t+1)} = g\left(s_{ab}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_p} s_{a+\alpha, b+\beta}^{(t)} + \lambda \sum_{(\alpha, \beta) \in V_n} s_{a+\alpha, b+\beta}^{(t)}\right).$$

2.8 Mechanizmus odletovania iskier

Mechanizmus odletovania iskier sa v pôvodnom modeli [8] nenachádza, jedná sa teda o rozšírenie. Vo väčšine modeloch je odletovanie iskier riešené ako stochastický proces a inak tomu nebude ani v našom prípade.

Po každom diskretnom časovom kroku \tilde{t} budú na základe veľkosti lokálnych požiarov vygenerované iskry. Smer ktorým iskry poletia prirodzene závisí od smeru vetra, s prípustným vychýlením o 15° v každom smere. Veľkosť trajektórie ktorú preletia je generovaná náhodne, ale do veľkej miery ovplyvnená rýchlosťou vetra. Následne počas prechádzania buniek v smere trajektórie iskier sa dĺžka ich doletu znižuje viac či menej v závislosti na členitosti horského povrchu. Pravdepodobnosť založenia nového lokálneho požiaru v mieste dopadu iskry je potom generovaná s prihliadnutím na horľavosť danej bunky.

Tieto lokálne požiare, ktoré vzniknú vplyvom iskier budú vo väčšine prípadoch zanedlho pohltené hlavným požiarom a preto na celkové výsledky simulácie často nemajú veľký vplyv. Iné je to v situácii pokiaľ šírenie požiaru zastavia alebo spomalia nehorľavé bunky (voda, skaly), ktoré tvoria prirodzené prekážky v šírení požiaru. V takomto prípade mechanizmus odletovania iskier poskytuje možnosť prenesenia požiaru aj cez dané prekážky, a práve to je jeho hlavný prínos.

Kapitola 3

Výpočet parametrov modelu

V predchádzajúcej kapitole bol popísaný použitý model na simuláciu šírenia lesného požiaru, ako aj všetky jeho mechanizmy. Na dosiahnutie čo možno najrealistickejších výsledkov simulácie sú kľúčovým faktorom správne zvolené parametre a koeficienty predstaveného modelu. Tieto koeficienty pri šírení požiaru reprezentujú jednotlivé fyzikálne zákonitosti, ako napríklad veľkosť vplyvu rýchlosti vetra na rýchlosť šírenia požiaru. Práve voľba týchto parametrov a výpočet daných koeficientov tvorí obsah tejto kapitoly.

3.1 Parametre a typy lesného povrchu

Najdôležitejším je parameter horľavosti popísaný v kapitole 2 a označovaný ako R . Udáva ako rýchlo sa šíri požiar v lesnom poraste daného typu bez vplyvu vetra a členitosti horského povrchu. Hodnota tohoto parametra závisí od viacerých faktorov ako napríklad vlhkosť, teda obsah vody v danom materiáli, hustota porastu, podiel vzduchu k hustote porastu, teplota, rýchlosť a intenzita prenosu tepla, hustota materiálu a mnohých iných. Podrobný popis jednotlivých parametrov a ich výpočet je nad rámec tejto práce a preto budú jednotlivé hodnoty horľavosti materiálov použitých v tejto práci prevzaté z iných článkov.

Ďalšími parametrami, ktoré je možné vyčítať z tabuliek uvádzaných pre jednotlivé typy lesného porastu alebo ich z týchto hodnôt vypočítať, sú: pomer daného materiálu k obsahu vzduchu na danej ploche, hustota materiálu, a iné [18].

V našom modeli budeme uvažovať 5 druhov materiálu, z každej hlavnej kategórie jeden. Tieto typy povrchu sa navzájom líšia ako horľavosťou tak aj vlhkosťou, výškou porastu a inými parametrami [1].

- **”Kríky a tráva”**: Prvý typ použitého materiálu tvoria kríky, tráva a prípadne rôzne lesné byliny. V tomto type materiálu sa požiar šíri pomerne rýchlo ale má menšiu intenzitu. Lesný porast tohoto typu dosahuje výšky až do dvoch metrov a hustota porastu je pomerne veľká. Palivová hustota samotného materiálu je malá, a pretože je tvorený z prevažne živých rastlín, obsahuje značnú časť vody čo má negatívny vplyv na jeho horenie.
- **”Ťažobné zvyšky”**: Tento typ povrchu tvoria takzvané ťažobné zvyšky, teda zvyšky stromov po ich vyrúbaní. Okrem pňov stromov sa tu nachádzajú aj popadané zvyšky mŕtvych stromov. Materiál ktorý sa nachádza na tomto povrchu zabezpečuje rýchle šírenie požiaru s vysokou intenzitou.

- **”Tvrdé drevo”**: Povrch je tvorený zvyčajne hustým porastom, ktorý tvoria stromy s tvrdým drevom a vysokou hustotou palivového materiálu. Požiar sa šíri relatívne pomaly a dĺžka plameňov ohňa je taktiež malá. Správanie požiaru je pomerne predpo-vedateľné, rýchlosť jeho šírenia do značnej miery ovplyvňuje sila vetra, ktorá spôsobuje odletovanie horiacich listov.
- **”Skaly a voda”**: Posledné typy povrchu sú skaly a voda. Oba tieto typy sú nehorľavé, takže platí $R = 0$, a tvoria prirodzené prekážky pre šíriaci sa lesný požiar. V tejto práci medzi nimi nebude uvažovaný žiadny rozdiel. Typ skál je tu iba preto, aby bolo možné vytvárať prekážky aj v miestach, kde nie je reálne možné aby bola voda (vrcholy kopcov atď.).

Parametre jednotlivých typov povrchov, ktoré budeme ďalej potrebovať nájdeme v tabuľke 3.1.

Typ povrchu	Parametre			
	R_o [km/h]	σ [ft. ⁻¹]	β	β_{op}
kríky a tráva	0,02425	2500	0,0010	0,0066
ťažobné zvyšky	0,01865	1500	0,0084	0,0084
hustý les	0,01209	2500	0,0200	0,0055

Tabuľka 3.1: Parametre pre rôzne typy povrchu

Parameter R_o predstavuje rýchlosť šírenia požiaru na danom povrchu bez vplyvu vetra a členitosti zemského povrchu a σ udáva veľkosť častíc paliva. Parametre β a β_{op} predstavujú reálnu a optimálnu hustotu porastu daného typu horského povrchu [18].

3.2 Koeficient vplyvu vetra

Vietor je jeden z najdôležitejších faktorov pri šírení požiaru. Koeficient vetra, v literatúre označovaný ako ϕ_w , je bezrozmerné číslo, ktorého hodnota udáva koľkonásobne sa vplyvom vetra zvýši rýchlosť šírenia požiaru.

Pretože rýchlosť vetra sa mení v závislosti na vzdialenosti od zemského povrchu, vo väčšej výške je rýchlosť vetra vyššia ako na úrovni lesného porastu, je potrebné určiť v akej výške budú hodnoty rýchlosti vetra uvažované. Svetová meteorologická organizácia udáva ako štandard meranie rýchlosti vetra vo výške 10 metrov, ale v Spojených Štátoch sa rýchlosť metra často meria vo výške dvadsiatich stôp, čo je niečo cez 6 metrov.

V modeloch pre simuláciu šírenia požiaru sa počíta s rýchlosťou vetra platnou pre takzvanú výšku očí¹. Je to výška okolo 1,7 metra, a práve tento údaj o sile vetra priamo vplýva na rýchlosť šírenia požiaru. Taktiež sa používa označenie, ktoré by sa dalo voľne preložiť do slovenčiny ako rýchlosť vetra v strednej výške plameňa², pre ktoré platia väčšinou rovnaké parametre merania [3].

Práve kvôli odlišným spôsobom merania vznikli viaceré spôsoby prepočtu medzi hodnotami nameranými v rôznych výškach. Jedným z nich je takzvaný vyrovnávací koeficient vetra³. Tento koeficient je bezrozmerné číslo, na základe ktorého po vynásobení hodnoty

¹v anglickej literatúre často označovaná ako eye-level wind speed

²v literatúre uvedené po anglicky ako mid-flame wind speed

³anglicky Wind Adjustment Factor

rýchlosti vetra nameranej podľa amerického štandardu týmto číslom, získavame hodnotu potrebnú na použitie v simulačnom modeli. Hodnota koeficientu je číslo menšie ako 1, čo je dôsledok toho, že sila vetra tesne nad zemou je významne redukovaná lesným porastom a vegetáciou. Samozrejme platí, že čím je lesný porast hustejší, tým viac je sila vetra redukovaná. Jednotlivé koeficienty platné pre rôzne prostredia sú uvádzané v tabuľkách [16].

Väčšina publikovaných modelov počíta so vstupnou hodnotou rýchlosti vetra meranou podľa amerického štandardu vo výške 20 stôp, ktorú následne upravuje pomocou spomínaného vyrovnávacieho koeficienta vetra. Preto z dôvodu jednoduchšieho porovnania výsledkov simulácie budú vstupné hodnoty vetra uvádzané v tejto práci platné pre rovnakú výšku merania. Pre typy povrchov použitých v tejto práci má vyrovnávací koeficient, potrebný na prepočet z rýchlosti vetra vo výške 20 stôp na rýchlosť vo výške okolo 5 – 6 stôp (midflame wind speed), hodnotu 0,4 [19].

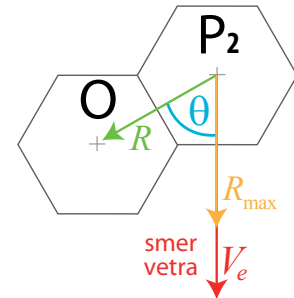
Vzťah použitý v tejto práci na výpočet koeficientu vetra, definovaný Rothermelom, vypadá nasledovne.

$$\phi_w = CU^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E} \quad (3.1)$$

kde ϕ_w je výsledný koeficient vplyvu vetra, C , B , E sú koeficienty vypočítané na základe parametrov daného typu materiálu a U je rýchlosť vetra v jednotkách stopa za minútu⁴. β je pomer hustoty porastu k objemu vzduchu, β_{op} je potom optimálny pomer pre najlepšie vlastnosti horenia, a ich pomer (β/β_{op}) udáva odchylku od tohoto ideálneho stavu.

Ak platí $(\beta/\beta_{op}) = 1$, znamená to, že materiál má ideálne horiace vlastnosti v bezvetří. Pokiaľ je hustota tohoto porastu menšia, platí $(\beta/\beta_{op}) < 1$, tak sa bude požiar šíriť rýchlejšie v prítomnosti vetra, pretože sila vetra nebude natoľko redukovaná [18].

Po vynásobení rýchlosti šírenia požiaru v danom materiáli R_o , a koeficientom vplyvu vetra ϕ_w , dostaneme rýchlosť ktorou sa bude šíriť požiar presne v smere vetra. V ostatných smeroch sa bude požiar šíriť pomalšie a najpomalšie sa bude šíriť proti smeru vetra. Na výpočet presnej rýchlosti šírenia v danom smere sú použité nasledujúce vzťahy s koeficientami z obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Závislosti zo vzťahu 3.2

$$R = R_{max} \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon \cos \theta}$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{l_w^2 - 1}}{l_w}, \quad l_w = 0,936e^{2566V_e} + 0,461e^{-1548V_e} - 0,397 \quad (3.2)$$

Výsledná rýchlosť šírenia požiaru v danom smere R , závisí od uhla odklonu od smeru vetra θ , rýchlosti vetra V_e (v metroch za sekundu) a parametrov ε a l_w [9] [2].

⁴1 stopa = 0,3048 metra

3.3 Koeficient vplyvu členitosti horského povrchu

V nasledujúcej sekcii bude popísaný koeficient vplyvu členitosti horského povrchu. Celkovo členitosť povrchu značne ovplyvňuje nielen rýchlosť šírenia požiaru ale aj jeho smer. Lesný požiar sa zvyčajne šíri rýchlejšie svahom nahor ako opačne. Je to zapríčinené hlavne tým, že plamene sú bližšie k danému palivu, teplo stúpa hore, dané palivo sa skôr vysuší a následne ľahšie vznieti [10].

V tejto práci je koeficient členitosti povrchu označovaný štandardne ako ϕ_s , a jeho hodnota je podobne ako koeficient vplyvu vetra bezrozmerné číslo. Toto číslo udáva koľko-násobne sa zvýši rýchlosť šírenia požiaru pri daných parametroch členitosti terénu.

Pri počítaní hodnoty koeficientu je pochopiteľne najdôležitejším faktorom uhol sklonu daného svahu po ktorom sa požiar šíri. Výslednú hodnotu ovplyvňuje ale taktiež parameter hustoty lesného porastu daného typu povrchu. Vzťah pre jeho výpočet ktorý predstavil Rothermel, vypadá nasledovne:

$$\phi_s = 5.275\beta^{-0,3} \sin^2 \theta, \quad (3.3)$$

kde β je spomínaný parameter hustoty porastu v závislosti na jeho type, a θ je uhol sklonu svahu [18].

V pokusných laboratóriách boli vykonané experimenty, ktorých cieľom bolo zdokumentovať vzťah medzi rýchlosťou šírenia ohňa a uhlom svahu po ktorom sa požiar šíri. Výsledkom týchto experimentov boli údaje, ktoré dokazujú mierne navýšenie rýchlosti šírenia požiaru do svahu s miernym prevýšením $1 - 10^\circ$, a nezanedbatelný takmer lineárny nárast rýchlosti pri sklone s uhlom $10 - 25^\circ$. V rozmedzí prevýšenia $25 - 31^\circ$ bol zaznamenaný dramatický nárast rýchlosti šírenia požiaru. Presné hodnoty sú závislé na materiále, ktorým bol tvorený zemský povrch. Pri uhle v rozmedzí $10 - 25^\circ$ je pozorovaný 2–6 násobný nárast rýchlosti, a pri väčších uhloch môže byť nárast oproti rýchlosti šírenia požiaru na rovnom povrchu 10 a viac násobný [23].

Kapitola 4

Architektúra simulátoru

V nasledujúcej kapitole bude popísaná architektúra simulátora šírenia lesného požiaru založeného na celulárnych automatoch, ktorý využíva model popísaný v kapitole 2. Súčasťou simulátoru je grafický editor modelu prostredia, pomocou ktorého je možné meniť počiatočné podmienky ako aj všetky parametre simulácie.

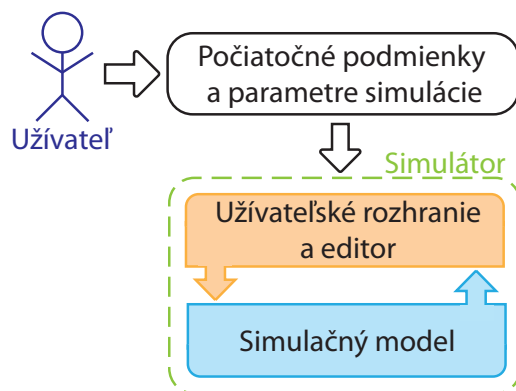
4.1 Základné charakteristiky

Ako bolo spomenuté simulátor sa skladá z dvoch častí, konkrétne z užívateľského rozhrania, ktorého súčasťou je grafický editor prostredia modelu, a zo simulačného modelu popísaného v predošlej kapitole.

Ako môžeme vidieť na obrázku 4.1 užívateľ najskôr zadá v užívateľskom rozhraní počiatočné podmienky a parametre simulácie. Medzi počiatočné podmienky patrí počiatočná konfigurácia celulárneho automatu a mapa členitosti horského povrchu, ktoré nastavíme pomocou grafického editoru zobrazujúceho šesťuholníkový bunecový priestor. Parametre simulácie potom zahŕňujú nastavenie modelu vetra, smer a silu.

Potom prebehne inicializácia simulačného modelu a následne je možné spustiť beh simulácie. Počas simulácie je grafický výstup aktuálnej konfigurácie celulárneho automatu zobrazovaný v simulačnom čase priamo v danom užívateľskom rozhraní.

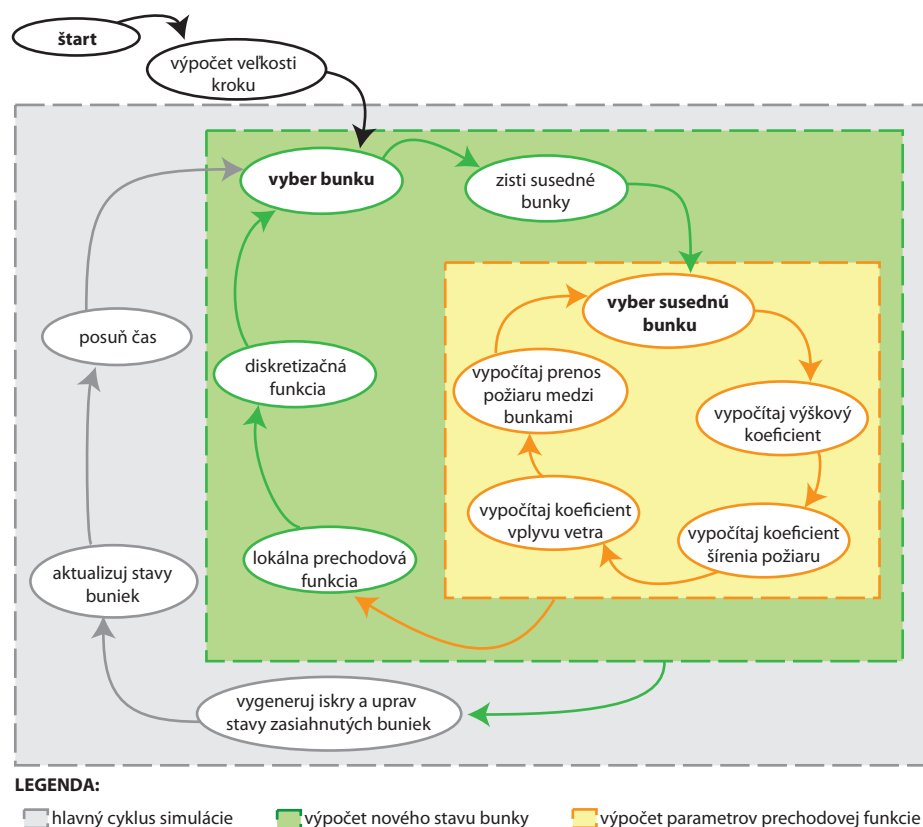
Jednotlivé parametre modelu (napríklad silu vetra) je možné ďalej ľubovoľne meniť aj počas behu simulácie. Z tohoto dôvodu je nevyhnutná komunikácia medzi užívateľským rozhraním a simulačným modelom počas celej doby simulácie, aby bolo možné vykreslovať aktuálnu konfiguráciu celulárneho automatu a meniť parametre modelu.



Obr. 4.1: Architektúra simulátoru

4.2 Simulačný model

Simulačný model je tvorený celulárnym automatom, ktorý využíva model na predpoveď šírenia požiaru popísaný v kapitole 2. Štruktúra simulačného modelu je zachytená na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Štruktúra simulačného modelu

Z obrázku môžeme vidieť, že simulačný model sa riadi jednoduchým algoritmom, pričom jednotlivé farebne odlíšené časti v ňom reprezentujú cykly.

Na začiatku simulácie sa vypočíta veľkosť diskrétného časového kroku (viď sekcia 2.3) a potom sa pre každú bunku z ohraničeného bunečného priestoru vypočíta jej nový stav. Pri výpočte najskôr potrebujeme zistiť súradnice susedných buniek z jej okolia (viď obrázok 2.3). Potom sa vypočítajú pre každú jednu susednú bunku dané koeficienty a prenos požiaru medzi hlavnou a danou susednou bunkou.

Nakoniec sa z jednotlivých medzivýsledkov, udávajúcich prenos požiaru medzi bunkami v okolí, vypočíta nová hodnota stavu bunky pomocou lokálnej prechodovej funkcie. Táto hodnota je nakoniec ešte upravená diskretizačnou funkciou tak, aby výsledný stav bol z konečnej množiny možných stavov.

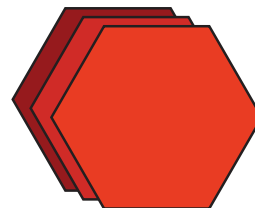
Potom ako sú vypočítané nové stavy pre všetky bunky z bunečného priestoru sa vygenerujú iskry, ktoré majú možnosť založiť vzdialenejšie lokálne požiare. Upravujú sa stavy buniek, ktoré boli zasiahnuté iskrami a následne sa aktualizujú všetky stavy buniek. Nakoniec sa posunie simulačný čas a pokiaľ nie je koniec simulácie, tak sa celý proces opakuje.

4.3 Uživatelské rozhranie

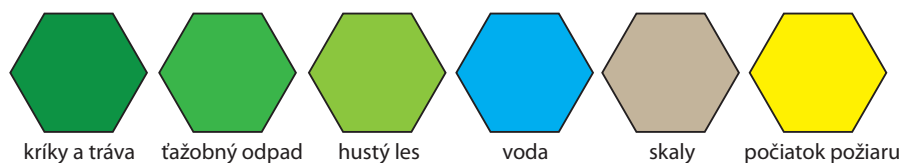
V uživatelskom rozhraní máme možnosť meniť jednotlivé parametre simulačného modelu, zadať počiatočné podmienky simulácie a po spustení simulácie následne sledovať jej priebeh.

Členitosť horského povrchu sa mení pomocou grafického editora prostredia, ktorý je reprezentovaný kresliacim plátnom. Štetcom maľujeme na kresliace plátno v stupňoch šedej farby a následne sa generuje 3D náhľad horského povrchu. Biela farba reprezentuje najmenšiu možnú nadmorskú výšku povrchu, ktorá lineárne narastá so stmavovaním farby až po čiernu, ktorá odpovedá najvyššej hodnote.

Typ terénu sa zadáva priamo v 3D prostredí, ktoré vykresľuje daný terén jednoduchým kliknutím myši. Na výber máme z rôzneho lesného porastu, skál a vody. Taktiež treba určiť počiatočné body požiaru odkiaľ sa následne bude ďalej šíriť. Toto všetko sa zadáva priamo do 3D prostredia zobrazujúceho terén tvorený šesťuholníkovými bunkami celulárneho automatu. V danom 3D prostredí je možné pomocou myši meniť uhol a vzdialenosť pohľadu kamery a pohybovať sa po mape. Každý šesťuholník nadobúda farbu podľa toho akého je typu a v akom stave (vzhľadom na šírenie požiaru) sa nachádza bunka, ktorú reprezentuje. Na obrázku 4.4 môžeme vidieť legendu k daným typom horského povrchu. Obrázok 4.3 zobrazuje príklad horiacich buniek, ktoré sú reprezentované červenou farbou, pričom intenzita farby závisí od stavu v akom sa daná bunka nachádza.



Obr. 4.3: Farby horiacich buniek



Obr. 4.4: Zobrazenie jednotlivých typov horského povrchu

Následne sa doladia ďalšie parametre ako smer a rýchlosť vetra, rýchlosť simulácie a parametre mechanizmu odletovania iskier.

Po spustení simulácie môžeme v danom 3D prostredí pozorovať šírenie požiaru s možnosťou zrýchliť, spomaliť alebo pozastaviť simuláciu a taktiež meniť niektoré parametre simulačného modelu. Po pozastavení alebo skončení simulácie sa nám sprístupnia štatistické výstupy simulácie. V týchto štatistikách nájdeme grafy a tabuľkové výsledky. Grafy zobrazujú narastajúci počet horiacich buniek a percentuálne zastúpenie jednotlivých typov povrchu v teréne. Tabuľky obsahujú informácie o maximálnych, minimálnych a priemerných hodnotách jednotlivých údajov ako napríklad rýchlosť šírenia požiaru, sklon povrchu a rýchlosť vetra.

Obrázky z užívateľského prostredia sa nachádzajú v prílohách.

Kapitola 5

Implementácia simulátoru

Simulátor je grafická aplikácia implementovaná pomocou jazyka C++ vo frameworku Qt¹. Na obrázku 5.1 môžeme vidieť zjednodušenú štruktúru programu. Kvôli prehľadnosti sú na obrázku zvýraznené len tie najpodstatnejšie prvky systému, ktoré tvoria jadro programu. Niektoré menej dôležité ako napríklad signál na zmenu veľkosti štetca na kresliacom plátne alebo trieda predstavujúca náhľad aktuálne zvolenej farby sú vynechané.

Štruktúra simulátora sa dá rozdeliť do piatich hlavných častí. Hlavné okno programu je tvorené triedou `MainWindow`, v ktorej prebieha interakcia medzi ďalšími objektami. Kresliace plátno, pomocou ktorého je generovaná členitosť horského povrchu, je tvorené triedou `GLPaintingWidget` a jeho inštancia predstavuje widget v hlavnom okne. Trieda `GLWidget3D`, ako názov napovedá, predstavuje 3D náhľad na terén tvorený šesťuholníkovou mriežkou a trieda `CellularAutomaton` je simulačný model implementovaný celulárnym automatom. Poslednou z hlavných tried programu je trieda `SimulationStats`, ktorá slúži na uchovávanie štatistík simulácie. Na vykresľovanie grafov je použitá voľne dostupná trieda `QCustomPlot`.

Aplikácia bola vyvíjaná a testovaná pomocou prostredia Qt Creator² verzie 5.0.2 v operačnom systéme Linux.

5.1 Hlavné okno programu (trieda `MainWindow`)

Hlavné okno programu tvorí trieda `MainWindow`, ktorá predstavuje zároveň aj rozhranie pre komunikáciu medzi jednotlivými objektami tak, ako to môžeme vidieť na obrázku 5.1. Trieda vytvorí okno s užívateľským rozhraním, ktoré obsahuje inštancie ostatných tried v podobe widgetov a rôzne nastavovacie a ovládacie prvky.

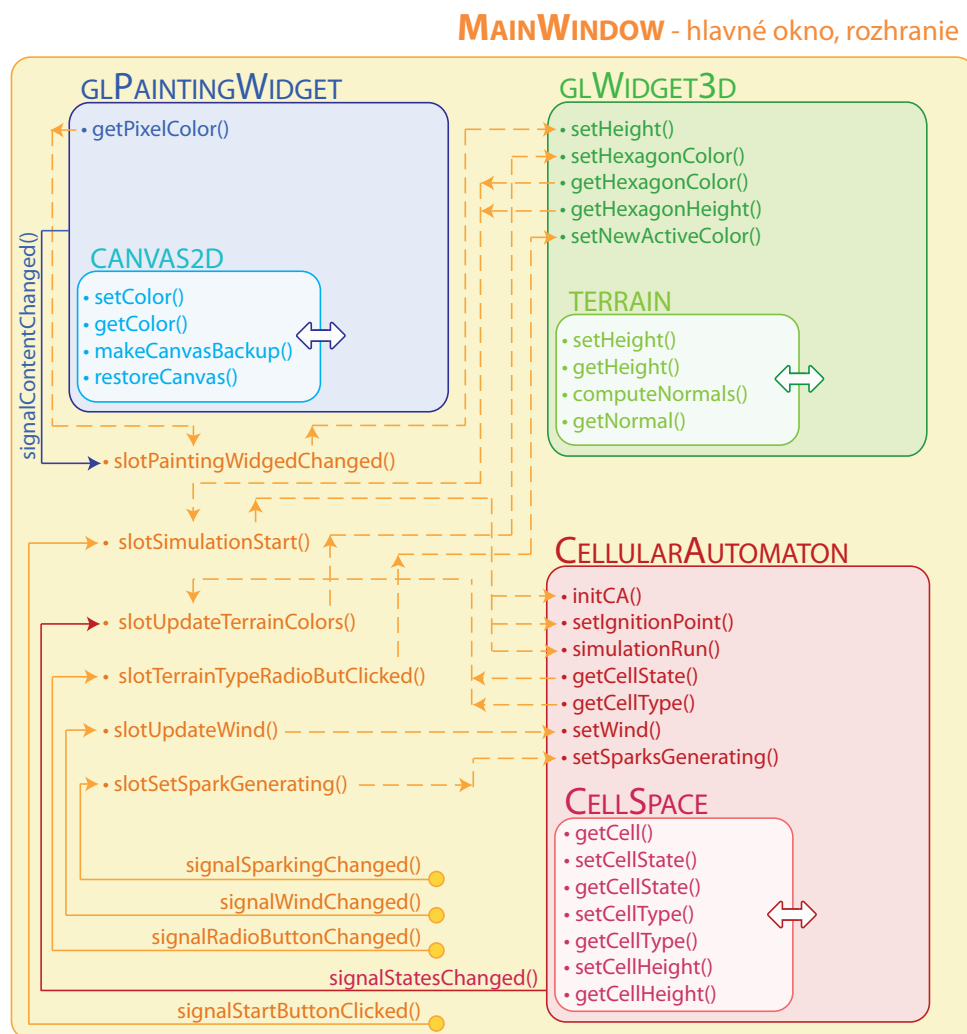
Nachádzajú sa tu napríklad `slidery` na voľbu veľkosti a farby štetca pre kresliace plátno tvorené widgetom triedy `GLPaintingWidget`. Tieto `slidery` pri zmene ich hodnoty generujú signály napojené na príslušné obslužné sloty v triede `GLPaintingWidget`. A práve aj toto prepojenie signálov a slotov má za úlohu trieda `MainWindow`.

Hlavné okno programu obsahuje taktiež vlastné sloty, na ktoré sú napojené napríklad signály generované pri zmene obsahu kresliaceho plátna alebo po každom simulačnom kroku celulárneho automatu. Ich úlohou je potom aktualizovať príslušné dáta widgetov podľa ich prepojenia.

Tieto sloty a signály hlavného okna sú na obrázku 5.1 znázornené oranžovým písmom. Signály generované spomínanými slidermi, tlačítkami alebo takzvanými rádiovými tlačítkami

¹Qt je multiplatformová knižnica pre vytváranie programov s grafickým užívateľským rozhraním.

²Qt Creator je integrované vývojové prostredie, ktoré je súčasťou frameworku Qt.



Obr. 5.1: Štruktúra simulátora

kami a inými prvkami nachádzajúcimi sa v hlavnom okne na obrázku začínajú oranžovou guľičkou. To značí, že sú generované priamo v triede MainWindow.

5.2 Kresliace plátno (trieda GLPaintingWidget)

Inštancia triedy `GLPaintingWidget`, ktorá je založená na triede `QGLWidget`, predstavuje kresliace plátno, na základe ktorého je potom generovaná členitosť horského terénu. Na plátno je možné maľovať v stupňoch šedej farby, pričom čierna farba je interpretovaná ako najväčšia možná nadmorská výška a biela naopak najmenšia.

Kresliace plátno je tvorené štvorcovou mriežkou, pričom každý štvorec môže nadobúdať práve jednu farbu, ktorá odpovedá hodnote výšky v danom bode pri nasledujúcom mapovaní do šesťuholníkovej mriežky terénu. Vykresľovanie daných štvorcov do mriežky je

implementované pomocou funkcií z grafickej knižnice **OpenGL**³.

Samotné kreslenie je vykonávané pomocou myši pri stlačení jej ľavého tlačítka a následným pohybom štetca po plátne. V okne widgetu sa automaticky vykresluje na pozícii kurzora stopa štetca, ktorej veľkosť a farbu je možné meniť pomocou spomínaných sliderov v hlavnom okne.

Po každom ukončení ťahu štetca je volaná privátna metóda **smoothCanvas()**, ktorá má za úlohu vyhladiť (rozmazať) jednotlivé prechody medzi farbami a je vygenerovaný signál **signalContentChanged()**. Vďaka tomuto vyhladzovaniu potom pri nasledujúcom mapovaní na 3D terén nevznikajú veľké výškové rozdiely na relatívne malej ploche a celý terén pôsobí hladšie. Nevýhodou tohto riešenia je to, že sa takto stráca možnosť vytvorenia útesov. V konečnom dôsledku je ale takto možné spraviť reálne vypadajúci terén v kratšom čase a pri menšej vynaloženej námahe.

Ako môžeme vidieť na obrázku 5.1, dáta sú ukladané do objektu triedy **Canvas2D**. Táto trieda obsahuje dátovú štruktúru s údajmi o farbách jednotlivých štvorcov tvoriacich kresliace plátno a metódy na prácu s týmito dátami, vytvorenie zálohy plátna a jeho obnovenie.

5.3 3D zobrazenie terénu (trieda **GLWidget3D**)

Vykreslenie terénu v 3D má za úlohu trieda **GLWidget3D**, ktorá je taktiež založená na triede **QGLWidget**. Na vykresľovanie šesťuholníkov, ktoré reprezentujú bunečný priestor celulórneho automatu sa používajú opäť základné funkcie z grafickej knižnice **OpenGL** a nadstavbová knižnica **GLUT**.

Terén je vykreslený pomocou perspektívnej projekcie, pričom je možné meniť uhol a polohu kamery. Po stlačení stredného tlačítka myši je možné premiestňovať kameru po mape, skrolovaním je možné približovanie alebo oddiaľovanie terén a stlačením pravého tlačítka myši sa vertikálne a horizontálne natáča kamera.

Po kliknutí ľavým tlačítkom myši na terén sa zmení farba šesťuholníka podľa aktuálne nastaveného typu bunky. Aktuálne nastavený typ bunky sa mení pomocou takzvaných rádiových tlačítok v hlavnom okne programu, pričom na výber je rôzne hustý lesný porast, skaly, voda alebo typ bunky reprezentujúci počiatok požiaru.

Aby bolo možné určiť na ktorý šesťuholník bolo kliknuté, je potrebné transformovať súradnice miesta kliknutia z okna widgetu na súradnice do vykresleného 3D sveta. O to sa stará funkcia z knižnice **GLU** s názvom **gluUnProject(...)**, medzi ktorej parametre patria dáta z použitých transformačných matíc. Keď poznáme súradnice 3D sveta z miesta kliknutia, je ešte nutné pomocou špecifického algoritmu zistiť index konkrétneho šesťuholníka. Ten dostaneme pomocou metódy **convertCoordinates(...)** z triedy **myHexagon**. Trieda **myHexagon** slúži na uchovávanie základných údajov o šesťuholníku tvoriaceho bunku, ako napríklad veľkosť strany, najmenší polomer, priemer a pod.

Všetky dáta o farbách a výškach šesťuholníkov sú uložené v inštancii triedy **Terrain**, ktorá zároveň obsahuje aj príslušné metódy na prácu s týmito dátami. Trieda taktiež obsahuje metódy na vypočítanie a následné vyhladenie normálových vektorov z jednotlivých bodov. Normály sú potrebné na vykresľovanie tieňov v teréne podľa aktuálnej pozície zdroja svetla.

³**OpenGL** je priemyselný štandard špecifikujúci multiplatformové rozhranie na tvorbu počítačovej grafiky.

5.4 Simulačný model (trieda CellularAutomaton)

Trieda `CellularAutomaton` reprezentuje simulačný model založený na celulárnom automate popísaný v kapitole 2. Táto trieda obsahuje verejnú metódu `initCA()`, ktorá inicializuje počiatočnými hodnotami dátové štruktúry buniek. Každú bunku tvorí štruktúra typu `cell_t` z hlavičkového súboru `cellDataType.h`, a obsahuje dáta o jej type, stave a nadmorskej výške v akej sa nachádza. Okrem toho obsahuje ďalšie metódy na zmeny parametrov simulácie (viď. obrázok 5.1).

V privátnej sekcii triedy sa nachádzajú metódy na výpočet jednotlivých parametrov a koeficientov modelu, lokálnej prechodovej funkcie, generovanie iskier a pod. Tieto metódy sú implementované na základe mechanizmov popísaných v kapitole 2 a znázornených na obrázku 4.2. Napríklad na nájdenie susedných buniek slúži privátna metóda `updateNeighborhood(...)`, ktorá si do dátovej štruktúry `neighborhood_t` (taktiež z hlavičkového súboru `cellDataType.h`) uloží odkazy na priamo a nepriamo susediace bunky s hlavnou bunkou pre ktorú sa bude počítať jej nový stav.

Dátové štruktúry buniek spolu s metódami, ktoré implementujú základné operácie s týmito dátami sa nachádzajú v triede `CellSpace`.

Po každom simulačnom kroku trieda `CellularAutomaton` generuje signál `signalStatesChanged()`, na základe čoho potom hlavné okno programu vykoná aktualizáciu dát a prekreslenie 3D terénu v príslušnom widgete.

5.5 Štatistiky simulácie (trieda SimulationStats)

Táto pomerne menšia, ale zato dosť dôležitá trieda má za úlohu uchovávať a spracovávať štatistické dáta simulácie. Je využívaná hlavne triedou `CellularAutomaton`, v ktorej sú štatistiky zaznamenávané a triedou `MainWindow`, ktorej úlohou je následne po skončení simulácie dané štatistiky zobraziť.

Trieda podporuje dva dátové typy štatistík, histogram a štandardný typ využívaný na získanie maximálnych, minimálnych a priemerných hodnôt. Pri vytvorení nového záznamu so štatistikami sa daný záznam pomenuje a pomocou tohoto názvu je neskôr možné k tomuto záznamu pristupovať. Trieda taktiež definuje rôzne operácie nad týmito záznamami, ako napríklad pridávanie dát, vymazanie obsahu záznamu, odstránenie záznamu a pod.

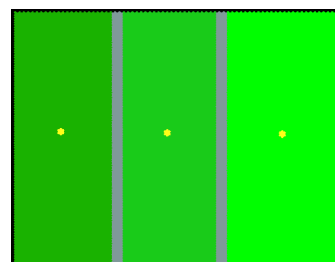
Kapitola 6

Experimenty so simulátorom

6.1 Horľavosť horského povrchu

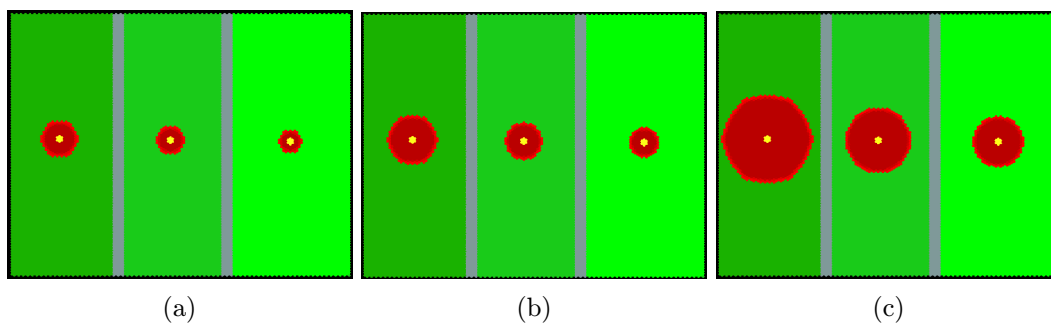
Ako sme sa dočítali v sekcii 3.1 v modeli uvažujeme celkovo 4 základné typy povrchu, respektíve materiálu. Cieľom tohoto experimentu bude overiť rozdiel medzi horľavosťou jednotlivých typov povrchu.

V experimente uvažujeme stav úplného bezvetria a rovinný terén. Výsledkom toho je, že rýchlosť šírenia požiaru závisí výlučne od horľavosti daného povrchu. Počiatočnú konfiguráciu môžeme vidieť na obrázku 6.1. Nachádzajú sa tu tri druhy lesného povrchu, konkrétne (v smere zľava doprava) kríky a tráva, ťažobný odpad a úplne napravo sú stromy z tvrdého dreva (viď. 3.1). Bariera medzi nimi je tvorená povrchom zo skál.



Obr. 6.1: Počiatočná konfigurácia

Priebeh experimentu je zachytený na obrázkoch 6.2. Ako môžeme vidieť, výsledok je podľa našich očakávaní. Materiály s rozdielnou horľavosťou horia odlišnou rýchlosťou. Oheň sa šíri kruhovo a najrýchlejšie horí tráva, ktorá sa nachádza úplne vľavo. Potom ťažobný odpad tvorený starým suchým drevom a nakoniec najpomalšie sa šíri požiar medzi stromami s tvrdým drevom.



Obr. 6.2: Obrázky zachytávajúce priebeh experimentu

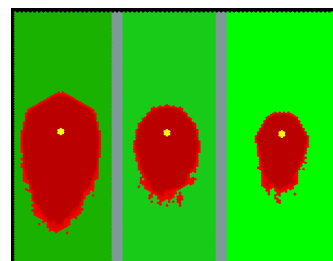
6.2 Vietor

V nasledujúcom experimente bude zobrazený a popísaný jeden z najdôležitejších faktorov pri šírení lesného požiaru, vietor. Počiatočná konfigurácia je podobná ako v experimente v sekcii 6.1 iba s tým rozdielom, že zo severu na juh fúka mierny vietor. Opäť sa tu nachádzajú tri typy horského povrchu, ktoré sú navzájom oddelené skalnou barierou.

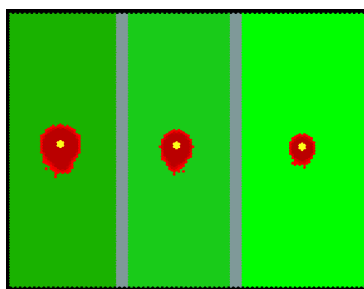
Na obrázkoch 6.4 môžeme pozorovať priebeh šírenia požiaru. Požiar sa podľa očakávaní šíri badateľne rýchlejšie v smere vetra. Na jednotlivých povrchoch nadobúda oblasť zasiahnutá ohňom pri rovnakej intenzite vetra mierne odlišný tvar. Príčinou je, že dané typy povrchu majú rôznu hustotu porastu a kladú vetru rozdielny odpor.

Úplne naľavo sa nachádza povrch tvorený zväčša trávou a kríkmi. Tento typ povrchu nedorastá do moc vysokých výšok, a preto kladie vetru pomerne malý odpor, a to aj napriek jeho hustému porastu.

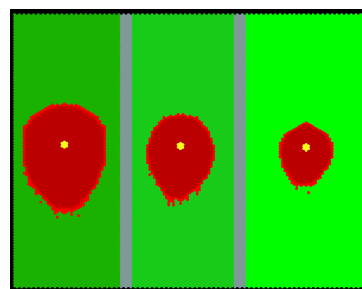
V strede sa nachádza povrch tvorený takzvaným ťažobným odpadom, ktorý pre vietor taktiež nepredstavuje výraznú prekážku. Posledný porast je tvorený stromami, ktoré narozdiel od predchádzajúcich povrchov silu vetra podstatne redukuje.



Obr. 6.3: Vplyv silného vetra



(a)



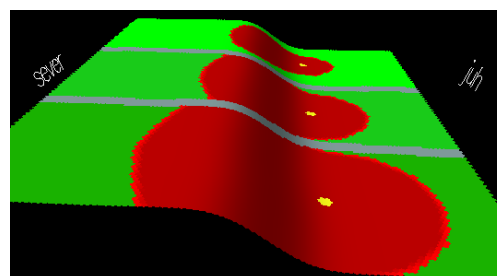
(b)

Obr. 6.4: Obrázky zachytávajúce priebeh experimentu

6.3 Členitosť horského povrchu

Ako napovedá názov predmetom skúmania v nasledujúcom experimente bude vplyv rôznorodosti horského povrchu na šírenie lesného požiaru. Ako sme sa dozvedeli v sekcii 3.1 požiar sa šíri rýchlejšie po svahu smerom nahor ako opačne, pričom rozhodujúcim faktorom je uhol jeho sklonu. Cieľom experimentu je overenie platnosti týchto tvrdení.

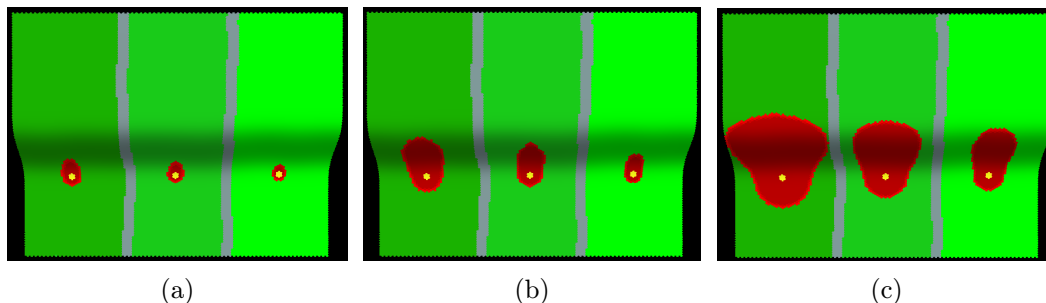
Tvar terénu je znázornený na obrázku 6.5. V priebehu experimentu bola nastavená nulová intenzita vetra a podobne ako v predchádzajúcich experimentoch je plocha rozdelená verti-



Obr. 6.5: Tvar terénu

kálne na tri pásy, tvorené rozdielnym lesným porastom a oddelené skalami.

Výsledky experimentu môžeme pozorovať na obrázkoch 6.6. Na základe tvaru zhorenej oblasti vidíme, že rýchlosť šírenia požiaru vzrástla pri šírení do kopca. Veľkosť oblasti, ktorú pohltí oheň je daná horľavosťou daného typu materiálu, ktorý tvoril povrch.



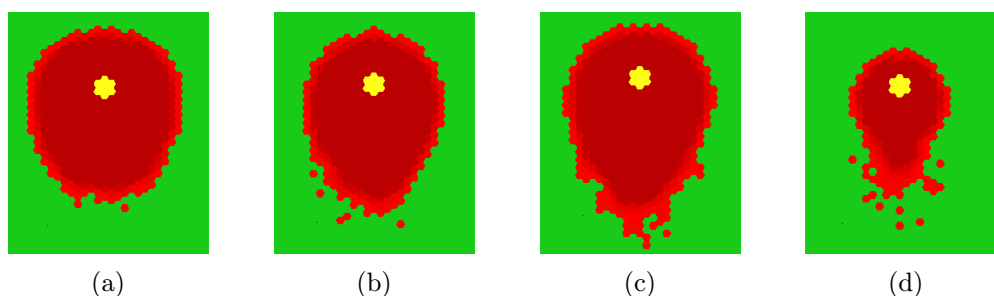
Obr. 6.6: Obrázky zachytávajú priebeh experimentu

6.4 Odletovanie iskier

V nasledujúcej sekcii budú popísané experimenty s modelom odletovania iskier, ktorého mechanizmus je popísaný v sekcii 2.8. Cieľom experimentov bude dokázať vplyv poveternostných podmienok a členitosti horského terénu na samotné odletovanie iskier.

6.4.1 Vplyv vetra na odletovanie iskier

Tento menší experiment má za úlohu demonštrovať vplyv sily a smeru vetra na odletovanie iskier. Smer vetra je konštantne nastavený zo severa na juh (zhora dole) a rýchlosť vetra sa v priebehu simulácie menila. Terén je rovinatý a tvorený lesným porastom so strednou horľavosťou.



Obr. 6.7: Obrázky zachytávajúce priebeh experimentu

Obrázky 6.7 znázorňujú priebeh experimentu. Obrázky neboli zachytené v rovnakom časovom kroku simulácie ale v okamihoch, kedy je pozorovaný jav najlepšie vidieť. Prvý obrázok 6.7a zachytáva šírenie iskier pri menšej intenzite vetra. Iskry dopadajú tesne pred úroveň požiaru, pričom sa nestihnú ani rozhorieť a hneď sú pohltené požiarom.

Na obrázkoch 6.7b a 6.7c so zvyšujúcou sa intenzitou vetra narastá aj vzdialenosť doletu iskier a tým sa zvyšuje aj čas potrebný na rozhorenie menších lokálnych požiarov.

Posledný obrázok 6.7d znázorňuje situáciu, kedy vietor dosahuje takú rýchlosť, že odletujúce iskry vytvárajú nové lokálne požiare, ktoré sa neskôr spájajú s hlavným požiarom a viditeľne zvyšujú rýchlosť šírenia požiaru.

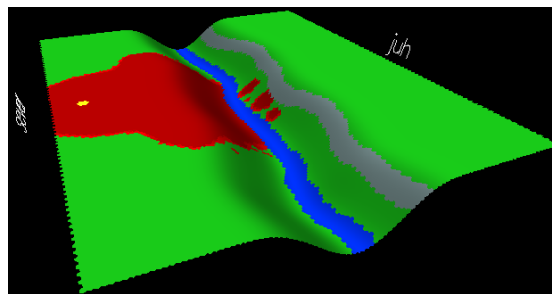
6.4.2 Prekonanie prirodzenej prekážky

Cieľom experimentu bude demonštrovať možnosť prekonania prirodzenej prekážky ohňa, ktorú v tomto prípade tvorí voda a skaly. Počiatočnú konfiguráciu terénu môžeme vidieť na obrázku 6.8. V experimente bola zvolená mierne vyššia rýchlosť vetra, kvôli početnejšiemu výskytu iskier a ich väčšiemu doletu. Smer vetra je zo severa na juh a terén je tvorený lesným porastom so strednou horľavosťou.

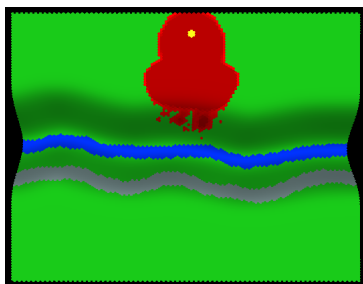
V teréne sú prítomné dve prekážky pozdĺž celej mapy. Tieto prekážky majú rovnakú šírku, pričom prvá, ktorú tvorí voda, sa nachádza hneď pod kopcom a druhá, tvorená skalným povrchom, na jeho vrchole.

Priebeh experimentu môžeme vidieť na obrázkoch 6.9. Na prvom obrázku 6.9a pozorujeme počiatočnú fázu horenia. Požiar sa šíri najviac v smere vetra na juh smerom ku svahu s prudkým klesaním. Klesanie spôsobilo, že iskry preleteli väčšiu vzdialenosť a požiaru sa podarilo prekonať prvý vodný tok, tak ako to znázorňuje obrázok 6.9b.

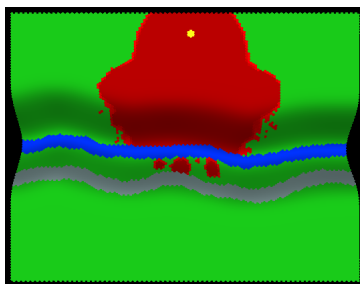
Na nasledujúcom obrázku 6.9c vidíme, že stúpanie prudkým svahom podľa očakávania znížilo dĺžku trajektórie iskier. To zapríčinilo, že oheň nedokázal zdolať druhú prekážku.



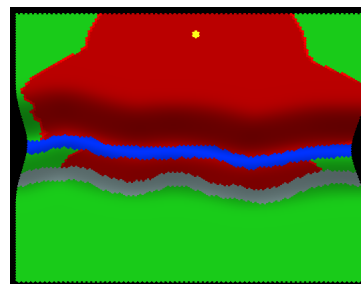
Obr. 6.8: Počiatočné podmienky experimentu



(a) počiatočná fáza



(b) prekonanie rieky



(c) dosiahnutie povrchu skál

Obr. 6.9: Obrázky zachytávajúce priebeh experimentu

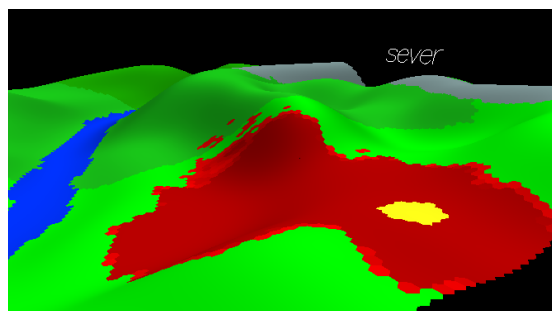
Z výsledkov experimentu môžeme pozorovať vplyv členitosti horského terénu na dĺžku trajektórie iskier. Podľa očakávaní prudké klesanie spôsobilo, že daná vzdialenosť, ktorú iskry preleteli bola dostatočná na prekonanie vodnej prekážky. V prípade šírenia požiaru do kopca daná vzdialenosť, ktorú iskry prekonali nebola dostatočná na rozšírenie požiaru cez skalnatý terén.

6.5 Komplexný experiment

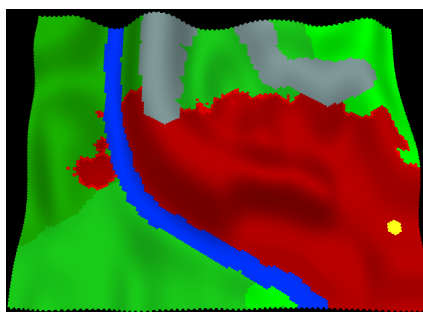
V tomto experimente si ukážeme členitejší typ povrchu a šírenie požiaru pri trochu zaujímavejšej počiatočnej konfigurácii. Cieľom je demonštrovať komplexné chovanie požiaru pri vplyve jednotlivých popísaných faktorov, ktoré naň pôsobia.

Na obrázku 6.10 môžeme vidieť počiatočnú fázu šírenia požiaru. Terén je výrazne členitý a obsahuje všetky typy spomínaných povrchov. Na vrcholku kopcov sa nachádzajú skaly a pod najväčším kopcom, ktorý sa ťahne cez celú mapu, sa nachádza rieka. Vietor strednej intenzity fúka z východu na západ.

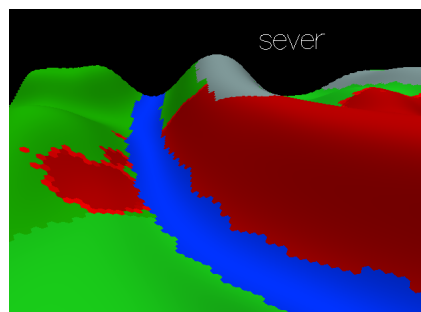
Priebeh požiaru znázorňujú obrázky 6.11. Tvar vyhorenej plochy je do veľkej miery ovplyvnený vetrom a členitosťou horského povrchu. Zaujímavosťou je, že oheň sa celý čas šírila po pomerne rovinatej teréne blízko rieky, ale prekonať túto prekážku bol schopný až keď sa šírila po prudkom svahu smerom nadol.



Obr. 6.10: Počiatočná fáza šírenia požiaru



(a)



(b)

Obr. 6.11: Obrázky zachytávajúce priebeh experimentu

6.6 Overenie validity

V nasledujúcej sekcii budú vyhodnotené výstupné štatistiky simulátora a výsledky experimentov za účelom zistenia miery použiteľnosti modelu. Následne budú zopakované niektoré experimenty z referenčných modelov a porovnané výsledky.

V prvom rade treba spomenúť, že simulátor používa simulačný model, ktorý je oproti tým komplexnejším, reálne používaným na predpoveď správania požiaru, značne zjednodušený. Riadi sa sídce podobnými alebo často dokonca rovnakými pravidlami, ale z časových dôvodov nebolo možné implementovať všetky pokročilejšie mechanizmy.

Prvým krokom pri overení validity modelu bude porovnanie získaných štatistických dát s výstupnými dátami simulátora. Kľúčovým aspektom je správne zvolenie parametrov jednotlivých typov povrchu. Keďže najdôležitejším faktorom pri šírení požiaru je vietor, bolo by vhodné overiť rýchlosť šírenia požiaru v poveternostných podmienkach.

Na začiatku overovania validácie som sa rozhodol porovnať údaje o rýchlosti šírenia požiaru. Referenčné dáta som čerpal z materiálov zaoberajúcich sa rozborom jednotlivých typov povrchu [1]. Všetky hodnoty sú merané pri rýchlosti vetra 8 km/h . Porovnanie referenčných hodnôt a štatistického výstupu simulátora zobrazuje tabuľka 6.12.

	Rýchlosť šírenia požiaru pri vetre s rýchlosťou 8 km/h [m/s]		
Typ horského povrchu	tráva a kríky	ťažobné zvyšky	hustý les
Referenčné hodnoty	0,100	0,072	0,042
Výstupy simulátora	0,093	0,067	0,048

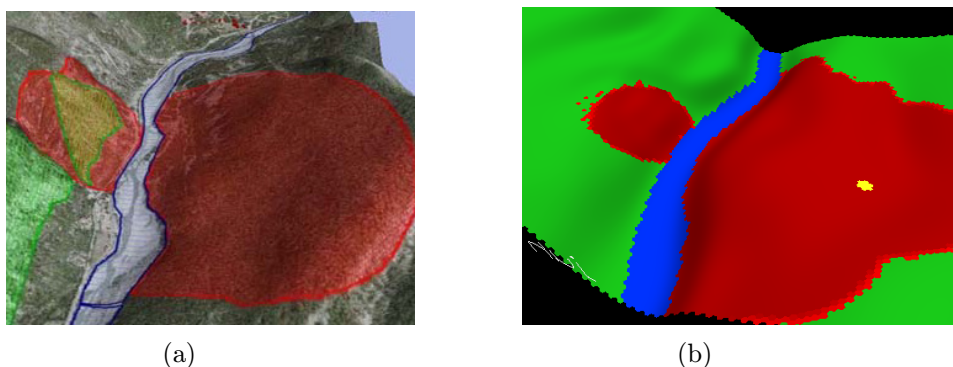
Obr. 6.12: Porovnanie rýchlosti šírenia požiaru

Výsledné rýchlosti šírenia požiaru sú podobné, a dovoľm si tvrdiť, že odchýlky od referenčných hodnôt niesú chybou. Pravdepodobne boli zapríčinené mierne odlišnými premenlivými parametrami daného paliva, ako napríklad vlhkosť, hustota porastu a pod.

Ďalšou fázou overovania validity simulátora je pokus o zopakovanie simulácií z rôznych referenčných simulátorov a porovnanie grafického výstupu. Vybrané referenčné modeli sú odlišné od modelu použitého v tejto práci. Plocha terénu v niektorých referenčných simuláciách dosahovala rozmery aj niekoľko kilometrov. Preto museli byť niektoré simulácie zopakované v menšej mierke terénu.

Najskôr boli nastavené počiatočné podmienky tak, aby sa čo najviac zhodovali. To bolo často obtiažne hlavne kvôli nedostatočne popísaným počiatočným podmienkam v daných referenčných simuláciách. Následne bola spustená simulácia a vo vhodnom momente zachytený jej stav pre porovnanie. V každej dvojici obrázkov je prvý obrázok referenčný, ktorému sa snažíme čo najviac priblížiť, a druhý grafický výstup nášho simulátora.

V prvom prípade na obrázku 6.13 môžeme vidieť situáciu známu z experimentov, kedy oheň prekoná bariéru tvorenú vodným tokom. Simulácia bola vykonaná na základe údajov z článku [7] odkiaľ bol prevzatý aj referenčný obrázok zobrazujúci grafické výsledky simulácie.

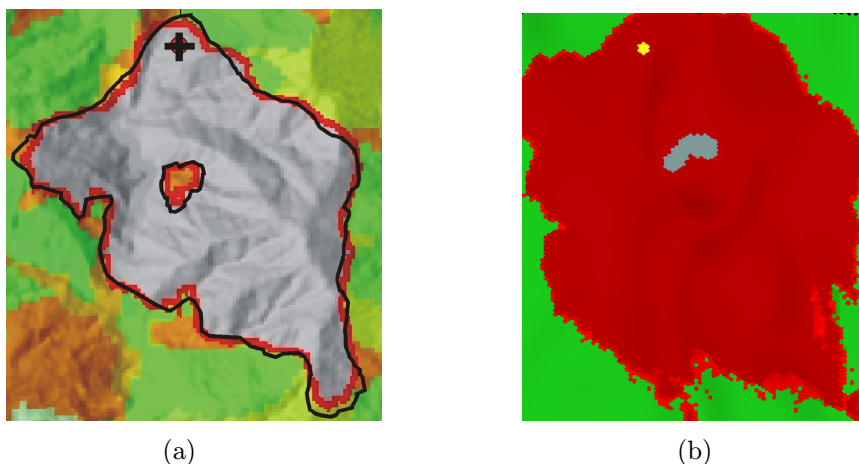


Obr. 6.13: Porovnanie výstupov s referenčným simulátorom

Ako môžeme vidieť, grafický výstup simulátora sa skutočne podobá na referenčný experiment. Rozdiely boli zapríčinené hlavne miernymi odlišnosťami v členitosti terénu. Požiar

sa šírila v smere vetra na západ po značne klesajúcom svahu. Nakoniec dosiahol úroveň vodného toku, ktorý následne prekonal v mieste kde bol najužší.

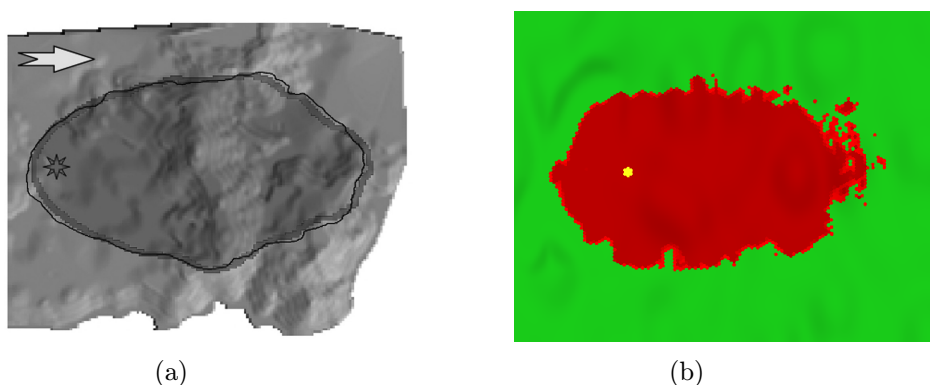
Ďalší referenčný experiment pochádza z článku [4], v ktorom je taktiež popísaný model na ktorom bola simulácia vykonaná. Grafický výstup tohoto experimentu, ktorý bol validovaný pomocou simulátora FARSITE, môžeme vidieť na obrázku 6.14a. Simulácia v našom simulátore musela byť prevedená v menšej mierke a jej výsledok je zobrazený na obrázku 6.14b.



Obr. 6.14: Porovnanie výstupov s referenčným simulátorom

Domnievam sa, že rozdiely medzi referenčným obrázkom a grafickým výstupom nášho simulátora sú spôsobené rozdielnou mierkou v ktorej bol tento experiment prevedený a taktiež nepresnosťami pri napodobovaní členitosti povrchu. Treba ale podotknúť, že veľkú úlohu tu zohral taktiež fakt, že referenčný obrázok je výstupom značne komplexnejších simulátorov (viď. FARSITE).

V poslednej dvojici obrázkov 6.15 bolo úlohou zopakovať experiment, pri ktorom sa lesný požiar šíri vplyvom silného vetra o rýchlosti 20 km/h na východ po členitom teréne. Referenčný obrázok je výstupom simulačného modelu z článku [21] a bol taktiež validovaný pokročilým simulátorom FARSITE.



Obr. 6.15: Porovnanie výstupov s referenčným simulátorom

Hladšie okraje požiaru v referenčnom obrázku sú spôsobené rozdielnou mierkou a taktiež faktom, že daný referenčný simulátor nemá implementovaný mechanizmus na odletovanie

iskier. Ako v predošlých prípadoch, tak aj tu boli určite niektoré rozdiely spôsobené nepresnosťami pri napodobovaní členitosti terénu.

Záver

V práci som sa zaoberal návrhom a implementáciou simulátora založeného na celulárnych automatoch, schopného predpovedať vývoj a správanie lesných požiarov. Text práce som sa rozhodol rozdeliť do šiestich ucelených kapitol.

Úvodná kapitola sa zaoberá problematikou celulárnych automatov, pretože ich základné znalosti sú potrebné na pochopenie nasledujúceho textu. Začiatok kapitoly je tvorený popisom histórie celulárnych automatov a dôvodom ich vzniku. Nasleduje definícia celulárneho automatu s rozborom jeho vlastností. V závere kapitoly som sa zmienil o klasifikácii celulárnych automatov a ich využití na simuláciu lesných požiarov.

Druhá kapitola sa zaoberala rozborom použitého matematického modelu. Pri výbere modelu zohral úlohu aj tvar použitej mriežky, nakoľko šesťuholníková sa mi zdala zaujímavejšia ako štandardne používaná štvorcová. Snažil som sa zachovať prehľadnosť tejto kapitoly a preto sú tu popísané a vysvetlené iba kľúčové matematické vzťahy, ktoré sú potrebné na pochopenie funkčnosti modelu. Pre lepšie pochopenie danej problematiky boli jednotlivé sekcie doplnené značným množstvom obrázkov. Keďže vybraný referenčný model je čisto matematický, bolo ho nutné doplniť o výpočet jednotlivých hlavných koeficientov a parametrov. Koeficienty určujú mieru vplyvu jednotlivých faktorov, ako napríklad vietor a členitosť horského povrchu, na šírenie požiaru. Pri ich štúdiu, voľbe a výpočte som strávil značnú časť celkového času a bola im venovaná aj samostatná kapitola. V nasledujúcich kapitolách bol rozobratý návrh architektúry simulátora a jeho následná implementácia. Pri návrhu bol braný ohľad hlavne na požiadavky zadania. Výsledný simulátor, ktorý sa nachádza na doprovdnom CD bol implementovaný vo frameworku Qt ako grafická aplikácia. Implementácia samotného simulačného modelu na báze celulárneho automatu bola v podstate jednoduchá. Kvôli lepšej prehľadnosti som sa rozhodol terén horského povrchu, na ktorom je vykonávaná simulácia, implementovať ako 3D. Z toho vyplynuli ďalšie problémy ako napríklad zisťovanie indexu šesťuholníka na ktorý bolo v 3D svete kliknuté, a pod.

Záver textu som sa rozhodol venovať experimentom so simulátorom. Uviedol som tu niekoľko experimentov, ktoré som pokladal za zaujímavé ukážky funkčnosti simulátora. Zvláštnu pozornosť som venoval taktiež overeniu validity modelu. Na jej dokázanie boli vykonané experimenty za účelom napodobenia grafických výstupov iných simulátorov. Taktiež boli porovnané štatistické údaje o rýchlosti šírenia požiaru v poveternostných podmienkach. Ako referenčné simulátory boli použité komplexnejšie pokročilé simulátory, medzi nimi aj reálne používaný americký model FARSITE. Z časových dôvodov nebolo možné implementovať všetky mechanizmy, ktoré používajú tieto pokročilé simulátory. Domnievam sa, že aj to je dôvodom určitých odlišností pri výslednom porovnaní grafických výstupov.

Práca by mohla pokračovať hneď v niekoľkých smeroch. Hlavný význam vidím v rozšírení simulačného modelu o pokročilejšie mechanizmy za účelom získania presnejších výsledkov simulácie. Zaujímavá by bola tiež možnosť načítania terénu priamo z importovanej mapy.

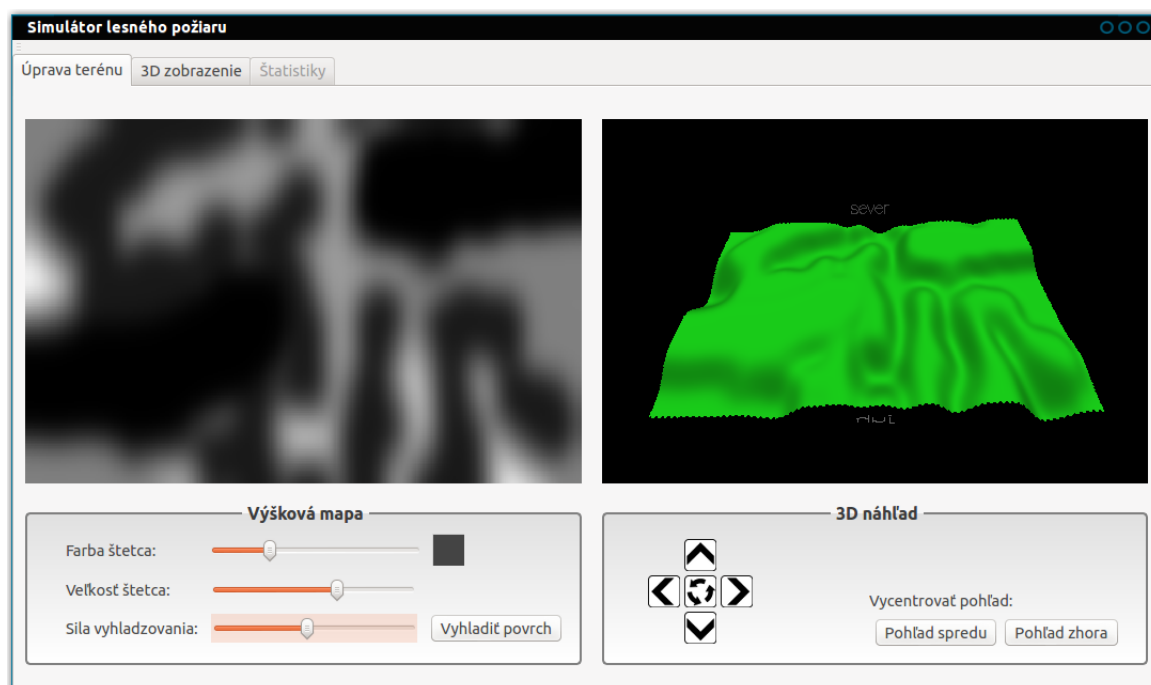
Literatúra

- [1] ANDERSON, H. E.: *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*. General technical report INT, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1981.
- [2] ANDERSON, H. E.: *Predicting wind-driven wind land fire size and shape*. Research paper INT, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1983.
- [3] ANDREWS, P. J.: Modeling wind adjustment factor and midflame wind speed for Rothermel's surface fire spread model. *Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.*, 2012.
- [4] AVOLIO, M. V.; GREGORIO, S. D.; LUPIANO, V.; aj.: Simulation of Wildfire Spread Using Cellular Automata with Randomized Local Sources. In *Cellular Automata, Lecture Notes in Computer Science*, ročník 7495, editace G. Sirakoulis; S. Bandini, Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-33349-1, s. 279–288.
- [5] BOYCHUK, D.; BRAUN, W. J.; KULPERGER, R. J.; aj.: A stochastic forest fire growth model. *Springer Science, Business Media*, 2008.
- [6] BUNDZEL, M.: Celulárny automat [online].
<http://alife.tuke.sk/newalife/kapitola/500/index.html>, [cit. 2012-12-11].
- [7] DUMOND, Y.: Forest Fire Growth Modelling with Geographical Information Fusion. *LISTIC Laboratory, University of Savoie*.
- [8] ENCINAS, L. H.; WHITE, S. H.; del REY, A. M.; aj.: Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling*, ročník 31, č. 6, 2007: s. 1213–1227, ISSN 0307-904X, doi:10.1016/j.apm.2006.04.001.
- [9] FINNEY, M. A.: *FARSITE, Fire Area Simulator—model development and evaluation*. číslo 4 in Research paper RMRS, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1998.
- [10] Fire Behaviour [online].
<http://bcwildfire.ca/FightingWildfire/behaviour.htm>, [cit. 2013-1-12].
- [11] GUTOWIZ, H.: *Cellular Automata: Theory and Experiment*. Bradford - Special Issues of Physica D Series, Mit Press, 1991, ISBN 9780262570862.
- [12] ILACHINSKI, A.: *Cellular Automata: A Discrete Universe*. World Scientific, 2001, ISBN 9789812381835.

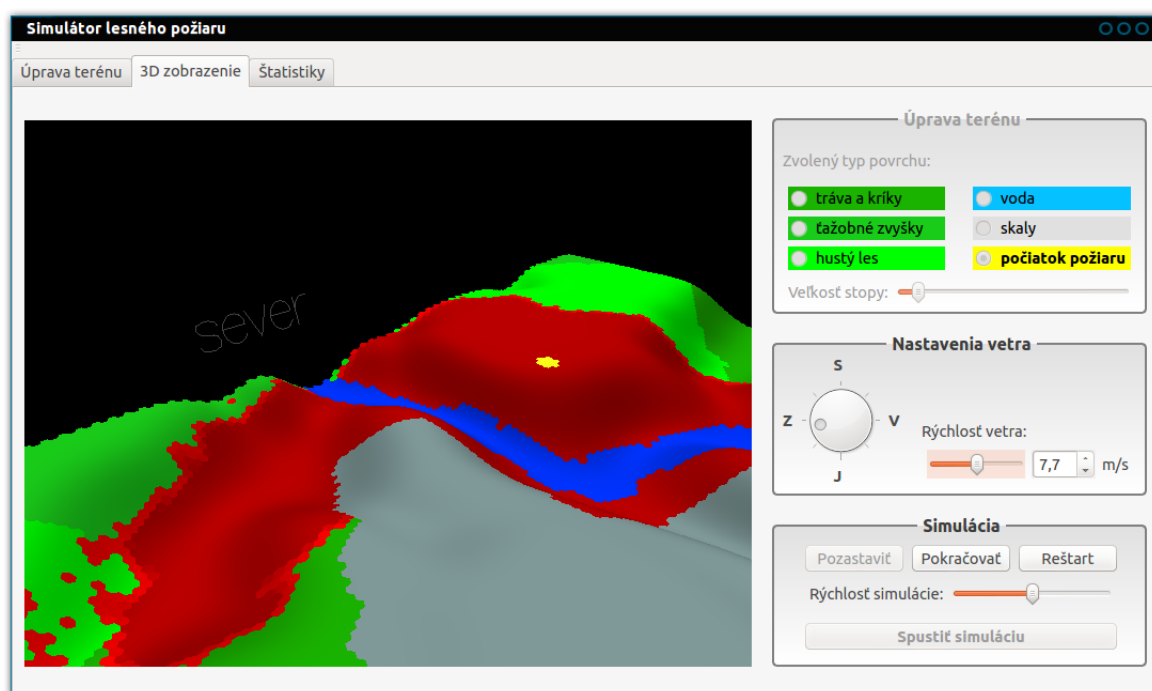
- [13] KARAFYLLIDIS, I.; THANAILAKIS, A.: A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, ročník 99, 1997: s. 87–97.
- [14] Lesné požiare [online].
forestportal.sk/ForestPortal/lesne_hospodarstvo/los/poziare/poziare.html,
 [cit. 2012-12-11].
- [15] MAZOYER, J.: *Cellular Automata: A Parallel Model*. Mathematics and Its Applications, Springer, 1998, ISBN 9780792354932.
- [16] Midflame Windspeed [online].
[www.firefightermath.org/index.php?option=com_content&view=article&id=78 &Itemid=92](http://www.firefightermath.org/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=92), [cit. 2013-1-12].
- [17] PERINGER, P.: Modelování a simulace, 2012, slajdy z prednášok IMS.
- [18] ROTHERMEL, R. C.: *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. USDA Forest Service research paper INT, Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture, 1972.
- [19] ROTHERMEL, R. C.: *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. General technical report INT, National Wildfire Coordinating Group, 1983.
- [20] SCHIFF, J. L.: *Cellular Automata: A Discrete View of the World*. Wiley Series in Discrete Mathematics & Optimization, Wiley, 2011, ISBN 9781118030639.
- [21] TRUNFIO, G. A.; D'AMBROSIO, D.; Rongo, R.; aj.: A New Algorithm for Simulating Wildfire Spread through Cellular Automata. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, ročník 22, č. 1, 2011, ISSN 1049-3301.
- [22] TYMSTRA, C.: *Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*. Information report, Northern Forestry Centre, 2009, ISBN 9781100146171.
- [23] WEISE, D. R.; BIGING, G. S.: Effects of wind velocity and slope on fire behavior. *Fire Safety Science - proceedings of the fourth international symposium*, 1994: s. 1041–1051.
- [24] Wikipedia: Cellular automaton [online].
http://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_automaton, 2012-12-11 [cit. 2012-12-11].
- [25] Wikipedie: Celulární automat [online].
http://cs.wikipedia.org/wiki/Celulární_automat, 2012-05-03 [cit. 2012-12-11].
- [26] Wikipedia: Rule 30 [online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Rule_30, 2012-11-11 [cit. 2012-12-11].
- [27] WOLFRAM, S.: *A New Kind of Science*. General science, Wolfram Media, 2002.

Dodatok A

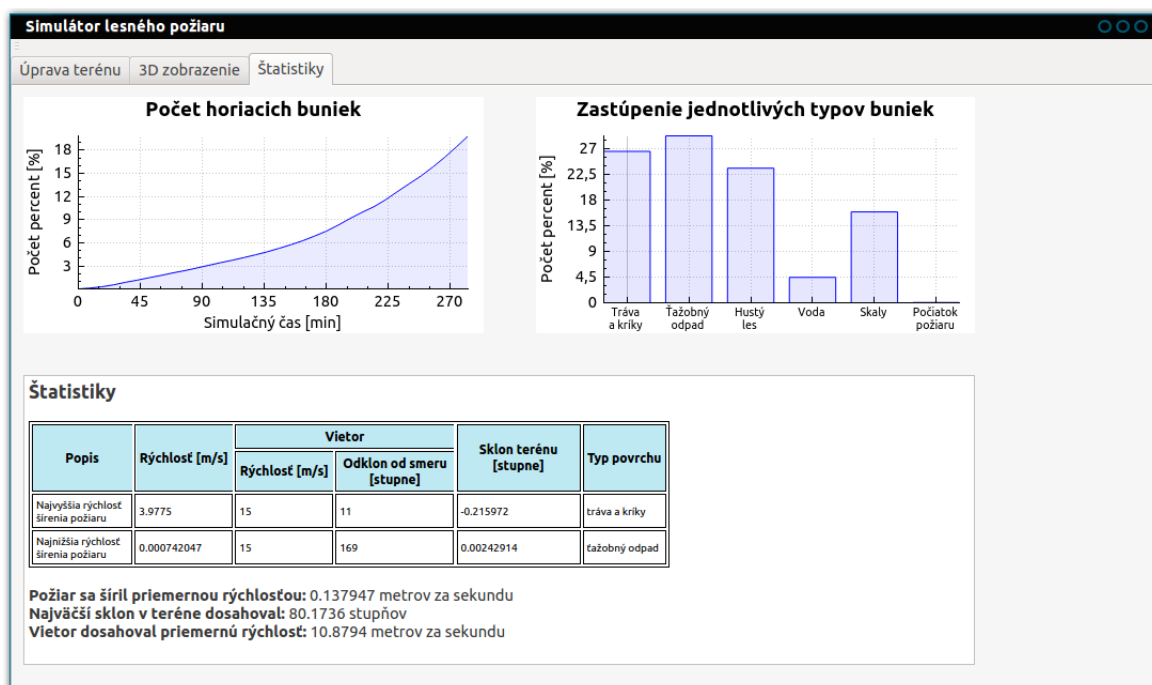
Obrázky výslednej aplikácie simulátora



Obr. A.1: Úprava členitosti terénu



Obr. A.2: Beh simulácie



Obr. A.3: Výsledné štatistiky simulácie

Dodatok B

Obsah CD

K práci je priložené doprovodné CD s nasledujúcou adresárovou štruktúrou:

- `simulator/` – priečinok obsahuje projekt z prostredia `Qt Creator` so zdrojovými súbormi simulátora.
- `pisomna_praca/` – zdrojové súbory v `LATEX`u potrebné na vygenerovanie písomnej časti bakalárskej práce a taktiež výsledný `PDF` súbor.