

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ
FAKULTA INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

Modelování a simulace
Epidemický model COVID-19 s
využitím stochastického
celulárneho automatu

December 7, 2020

Tým: One Man Army
Michal Koval(xkoval17)

Contents

1	Úvod	2
1.1	Autori a zdroje	2
1.2	Overenie validity	2
2	Rozbor tématu a použitých metod/technológií	3
2.1	Použité postupy	3
2.2	Pôvod použitých metod/postupov	3
3	Koncepcia modelu	4
3.1	Popis konceptuálneho modelu	4
3.2	Forma konceptuálneho modelu	5
4	Architektura simulačného modelu	6
4.1	Mapovanie konceptuálneho modelu do simulačného modelu	6
5	Podstata simulačných experimentov a ich význam	7
5.1	Postup experimentovania	7
5.2	Experimenty	8
5.2.1	Hustota obyvateľstva a zamedzovanie pohybu	8
5.2.2	Efekty pravdepodobnosti styku s nákazou	9
5.2.3	Efekty pravdepodobnosti nakazenia sa	9
5.3	Závery experimentovania	10
6	Zhrnutie simulačných experimentov a záver	10

1 Úvod

V tejto práci je riešená implementácia modelu epidémie COVID-19. COVID-19 je najväčšia svetová pandémia za posledné roky. Avšak ešte sme ju nepokorili, preto má zmysel ju skúmať, aby sme vedeli robiť správne kroky v boji proti nej. Pomocou tohto modelu, môžeme pozorovať priebeh pandémie za rôznych okolností, ktoré sa odvíjajú napríklad od miesta, kde hraje veľkú rolu hustota obyvateľstva ako aj zavedenie rôznych opatrení proti šíreniu nákazy.

1.1 Autori a zdroje

Projekt vypracoval Michal Koval študent FIT VUT v Brne. Model vychádza z vedeckého článku [1].

1.2 Overenie validity

Overenie validity prebehlo spravením rovnakých experimentov ako v zdrojovom článku. Namerané hodnoty ako napr. maximálny počet nakazených sa líšia, ale správanie ako reakcie a trendy pri zmenách parametrov sú rovnaké.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technológií

COVID-19 spôsobil globálnu pandémiu [2]. Medzi je jeho hlavné príznaky patria problémy s respiratorným systémom, horúčky, kašeľ, kýchanie [3]. Ojedinele sa vyskutujú aj hnačky a vo vážnych prípadoch môže mať následky aj poškodenie obličiek či srdca [4][5]. Vírus sa šíri z osoby na osobu v blízkom kontakte, pomocou malých kvapôčiek šírených do vzduchu infikovanou osobou pri kašľaní a kýchaní [6]. Vzhľadom na to, že o víruse ešte všetko nevieme a v praxi je šanca na rozšírenie vírus ovplyvnená viacerými faktormi, považujeme šancu na infekciu za jeden z parametrov simulácie, ktorého dopad na vývoj epidémie budeme skúmať. Človek, po kontakte s vírusom a infikovaní, nemusí prejavíť žiadne symptómy a ochorieť. Môže byť iba prenášač [7]. Odhaduje sa, že 18% až 41% infikovaných ľudí sa nakazí [8][9]. Pravdepodobnosť nakazenia sa je ďalší z parametrov simulácie. Nakazení ľudia majú rôzny priebeh choroby, ale ukazuje sa že s vekom je priebeh ťažší. V tejto simulácii neberieme ohľad na individuálny vek ľudí. Dôležitým faktorom v boji proti epidémii je poskytnutie zdravotnej pomoci chorým a včasné detekovanie nakazených. Najmä počas prvej vlny keď, sme ešte neboli pripravený sa ukázalo že v poskytnutie tejto pomoci všetkým nakazeným nie je realisticky možné [10]. Túto skutočnosť modelujeme pravdepodobnosťou detekcie choroby, teda vykonaním pozitívneho testu a pravdepodobnosťou vyzdravenia. Tieto parametre predstavujú úroveň medicínskeho systému v zasiahnutej krajine.

2.1 Použité postupy

Model bol navrhnutý pomocou stochastického celulárneho automatu. Celulárne automaty sú pri epidemických modeloch vhodné preto, lebo poskytujú jednoduchú abstrakciu nad priestorom, v ktorom sa nákaza šíri.

Pre implementáciu modelu bol použitý jazyk C++ a jeho štandardné knižnice. Tento jazyk je pre implementáciu vhodný najmä kvôli rýchlosti, keďže s veľkosťou plochy celulárneho automatu a aj hustotou obyvateľstva, množstvo potrebných výpočtov pre každú iteráciu lineárne stúpa. Ďalej bol vhodný pre jednoduchú implementáciu celulárneho automatu, keďže poskytuje objekt vector, ktorý bol v našej implementácii použitý ako štruktúra pre plochu celulárneho automatu.

2.2 Pôvod použitých metod/postupov

Model bol prevzatý z vedeckého článku [1]. Pre jazyk C++ bol dodržaný štandard C++11. Na preklad bol použitý GNU Make.

3 Koncepcia modelu

Model je navrhnutý ako stochastický celulárny automat PCA na štvorcovej mriežke, každá bunka mriežky predstavuje polohu v priestore. Bunky sa v prvom rade delia na základe hustoty obyvateľstva na prázdne a na residencie/oblasti s ľuďmi. Stavy automatu predstavujú fázy priebehu vírusu v jednotlivých ľudských bunkách a rozdeľujeme ich podľa SEIQR modelu. S je počiatočný stav a predstavuje susceptible ľudí, teda takých, ktorí sa ešte nedostali do kontaktu s vírusom. E znamenajú exposed, takže bunky, ktoré sa už dostali do kontaktu a môžu byť infekčný, ale ešte neprejavujú príznaky choroby. I sú infected, teda príznaky sa prejavili a ľudia sú nakazení, nie sú však ešte v karanténe a vírus môže ďalej šíriť. Q je quarantined stav, a predstavuje subpopuláciu, ktorá bola po nakazení otestovaná a zareadená do karantény, takže vírus ďalej už šíriť nemôžu, resp. ak áno tak predpokladáme, že veľmi zanedbateľne a pri šírení už s nimi v simulácii nerátame. R je konečný stav a znamená recovered/removed a predstavuje subpopuláciu, ktorá si vírusom prešla, takže sa buď vyliečila alebo zomrela, táto diferencia nie v pre simulačne potreby dôležitá, pretože ani jedna skupina vírus už ďalej nešíri.

3.1 Popis konceptuálneho modelu

Určenie susedov

V celulárnom automate používame Moore neighborhood pravidlá pre určenie susediacich buniek a teda na simulovanie pohybu ľudí a kontaktu s inými ľuďmi.

Čas

Jedna simulačná časová jednotka t predstavuje jeden deň reálneho sveta. Simulácia sa začína v čase t_0 , ktorý predstavuje prvotný príchod vírusu do skúmanej populácie. Stav v čase t je počítaný zo stavu automatu v čase $t-1$.

Pravidlá

1. Ak je osoba susceptible S a má vo svojom okolí, určenom parametrom vzdialenosti d , ľudí vystavených vírusu E alebo nakazených I ľudí, má konečnú pravdepodobnosť sa dostať do kontaktu s vírusom
2. Vystavení ľudia vírusu E môže šíriť ďalej vírus
3. Vystavení ľudia vírusu E majú konečnú pravdepodobnosť, že sa nakazia (prechod do I). Nakazení môže tiež ďalej šíriť vírus
4. Nakazení ľudia I majú konečnú pravdepodobnosť, že budú detekovaní testom a umiestnení do karantény, odkiaľ vírus šíriť nemôžu
5. Populácia je v konštantom stave vzhľadom k počtu. Pohyb ľudí, imigrácia, narodenie nie sú brané do úvahy.

6. Smrť odstraňuje ľudí z populácie (prechod od R), rovnako ako aj keď sa človek vylieči.

Prechody medzi stavmi

- Kontakt s vírusom $S \rightarrow E$: prechod nastáva s pravdepodobnosťou $1 - (1 - pe)^{(ni + ne)}$, kde pe predstavuje parameter pravdepodobnosti kontaktu s vírusom, ni je počet nakazených I susedov a ne je počet susedov E, ktorí už boli v kontakte s vírusom
- Nakazenie sa, prejav symptómov $E \rightarrow I$: nastáva po priemernej inkubačnej dobe ti , ktorá je po väčšinu experimentov 8, ak to nie je spomenuté ináč, a s pravdepodobnosťou nakazenia sa a prejavu symptómov pi
- Umiestnenie do karantény $I \rightarrow Q$: nastáva po priemernej dobe vykonania testov a získania ich výsledkov tq , s pravdepodobnosťou pq , tieto parametre modelujú a skúmajú efektívnosť testovania v krajine
- Vyzdravenie $Q \rightarrow R$, $I \rightarrow R$: nastáva po priemernej dobe vyzdravenia tr a s pravdepodobnosťou pr , tieto parametre modelujú a predstavujú úroveň zdravotného systému a jeho efektívnosť v boji proti ochoreniu

3.2 Forma konceptuálneho modelu



Figure 1: Stavy a prechody modelu

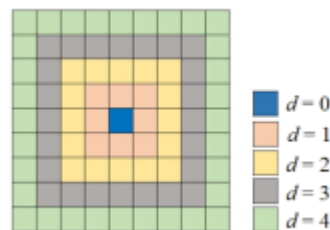


Figure 2: Moore neighborhood určenie susedov buniek

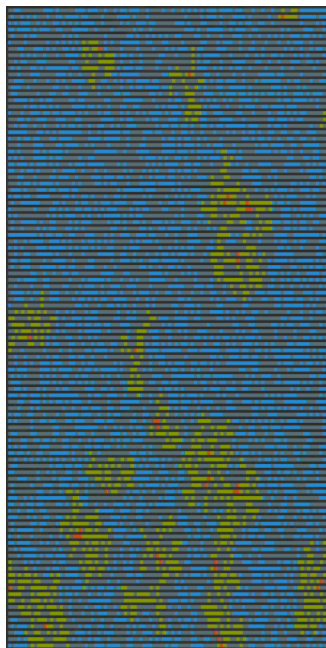


Figure 3: Znáznorenie 2D priestoru celulárneho automatu, šedé bunky sú prázdne, bunky s ľuďmi sú zafarbené podľa stavu, rovnaké farby sú použité ako v Fig.1

4 Architektura simulačného modelu

Simulácia sa začína inicializáciou objektu triedy `CellularAutomata`, do ktorého dáme parametre pre aktuálny experiment. Spúšťa sa zavolaním metódy `run` a končí buď vypršaním časového limitu, ktorý môže byť zadaný ako parameter pre automat `timeLim` alebo dosiahnutím stáleho stavu celulárneho automatu, ktorý sa nadobudne vtedy, ak sa za jednu časovú jednotku t nezmení stav ani jednej bunky v celej ploche automatu. V každom cykle behu automatu sa aktualizujú stavy buniek na základe vopred definovaných pravidiel v sekcii 3.1. Pri spustení simulácie s príkazom `make run` sa spustia všetky experimenty za radom ako sú popísané v sekcii 5.

4.1 Mapovanie konceptuálneho modelu do simulačného modelu

Trieda `Cell`, ktorá je jedna bunka na ploche celulárneho automatu a má pevne stanovenú pozíciu predstavuje ľudí. V priebehu simulácie nadobúda stavy celulárneho automatu. Trieda `CellularAutomata` predstavuje celý systém, spoločnosť, jej plochu aj s ľuďmi, pravidlá a opatrenia ktoré sú v nej zavedené.

5 Podstata simulačných experimentov a ich význam

Podstatou simulačných experimentov bolo skúmať rôzne parametre modelu ako napríklad pravdepodobnosť kontaktu s vírusom p_e , či hustota obyvateľstva D a ich dopad na celkový priebeh epidémie.

5.1 Postup experimentovania

Veľkosť plochy sme v porovnaní so zdrojovým článkom zmenšili na štvorcovú mriežku o rozmeroch 200×200 pre zrýchlenie simulácií. Keďže máme štvrtinovú plochu tak aj počet prvotných vystavených E_{int} a nakazených I_{int} nastavíme na štvrtinu, teda $E_{int} = 50$ a $I_{int} = 2$. Ak nie je stanovené pri experimentoch ináč, tak parametre sú nasledovné:

- $d = 1$, vzdialenosť pohybu ľudí
- $p_e = 0.5$, pravdepodobnosť kontaktu s vírusom
- $p_i = 0.5$, pravdepodobnosť nákazy
- $t_i = 8$, inkubačná doba
- $p_q = 0.1$, pravdepodobnosť otestovania/vstupu do karantény
- $t_q = 2$, doba, po ktorej nastane možnosť vtupu do karantény
- $p_r = 0.12$, pravdepodobnosť vyzdravenia
- $t_r = 18$, doba, po ktorej môže nakazení vyzdraviť
- $D = 0.46$, hustota obyvateľstva

5.2 Experimenty

5.2.1 Hustota obyvateľstva a zamedzovanie pohybu

S rastúcou hustotou obyvateľstva a voľnosťou pohybu rýchlosť šírenia vírusu stúpa exponenciálne. To zrýchľuje celkový priebeh vírusu v populácii a môže to mať za následok preplnenie nemocníc a karanténnych lôžok, v prípade slabšej zdravotnej výbavi štátu.

```
t: 0 | S: 7910 , 0.98875% | E: 88 , 0.011% | I: 2 , 0.00025% | Q: 0 , 0% | R: 0 , 0% |
t: 10 | S: 7719 , 0.964875% | E: 182 , 0.02275% | I: 98 , 0.01225% | Q: 1 , 0.000125% | R: 0 , 0% |
t: 20 | S: 7671 , 0.958875% | E: 52 , 0.0065% | I: 157 , 0.019625% | Q: 120 , 0.015% | R: 0 , 0% |
t: 30 | S: 7667 , 0.958375% | E: 4 , 0.0005% | I: 91 , 0.011375% | Q: 200 , 0.025% | R: 38 , 0.00475% |
t: 40 | S: 7667 , 0.958375% | E: 0 , 0% | I: 19 , 0.002375% | Q: 122 , 0.01525% | R: 192 , 0.024% |
t: 50 | S: 7667 , 0.958375% | E: 0 , 0% | I: 5 , 0.000625% | Q: 40 , 0.005% | R: 288 , 0.036% |
t: 60 | S: 7667 , 0.958375% | E: 0 , 0% | I: 2 , 0.00025% | Q: 12 , 0.0015% | R: 319 , 0.039875% |
t: 70 | S: 7667 , 0.958375% | E: 0 , 0% | I: 1 , 0.000125% | Q: 7 , 0.000875% | R: 325 , 0.040625% |
t: 80 | S: 7667 , 0.958375% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 4 , 0.0005% | R: 329 , 0.041125% |
t: 90 | S: 7667 , 0.958375% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 1 , 0.000125% | R: 332 , 0.0415% |
End:
imax : 180imax %: 0.0225
```

Figure 4: Nízka hustota obyvateľstva d=20%, vzdialenosť d=1

```
t: 0 | S: 7997 , 0.988375% | E: 91 , 0.011375% | I: 2 , 0.00025% | Q: 0 , 0% | R: 0 , 0% |
t: 10 | S: 7720 , 0.965% | E: 175 , 0.021875% | I: 103 , 0.012875% | Q: 2 , 0.00025% | R: 0 , 0% |
t: 20 | S: 7689 , 0.961125% | E: 31 , 0.003875% | I: 157 , 0.019625% | Q: 123 , 0.015375% | R: 0 , 0% |
t: 30 | S: 7688 , 0.961% | E: 1 , 0.000125% | I: 69 , 0.008625% | Q: 199 , 0.024875% | R: 43 , 0.005375% |
t: 40 | S: 7688 , 0.961% | E: 0 , 0% | I: 16 , 0.002% | Q: 103 , 0.012875% | R: 193 , 0.024125% |
t: 50 | S: 7688 , 0.961% | E: 0 , 0% | I: 1 , 0.000125% | Q: 40 , 0.005% | R: 271 , 0.033875% |
t: 60 | S: 7688 , 0.961% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 15 , 0.001875% | R: 297 , 0.037125% |
t: 70 | S: 7688 , 0.961% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 6 , 0.00075% | R: 306 , 0.03825% |
t: 80 | S: 7688 , 0.961% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 0 , 0% | R: 312 , 0.039% |
t: 90 | S: 7688 , 0.961% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 0 , 0% | R: 312 , 0.039% |
End:
imax : 189imax %: 0.023625
```

Figure 5: Vysoká hustota obyvateľstva d=70% vzdialenosť d=1

```
t: 0 | S: 27505 , 0.982321% | E: 493 , 0.0176071% | I: 2 , 7.14286e-05% | Q: 0 , 0% | R: 0 , 0% |
t: 10 | S: 4317 , 0.154179% | E: 22605 , 0.807321% | I: 1077 , 0.0384643% | Q: 1 , 3.57143e-05% | R: 0 , 0% |
t: 20 | S: 0 , 0% | E: 4541 , 0.162179% | I: 17726 , 0.633871% | Q: 5733 , 0.20475% | R: 0 , 0% |
t: 30 | S: 0 , 0% | E: 18 , 0.000642857% | I: 9044 , 0.323% | Q: 18499 , 0.660679% | R: 439 , 0.0156786% |
t: 40 | S: 0 , 0% | E: 0 , 0% | I: 2009 , 0.07175% | Q: 13826 , 0.465214% | R: 12965 , 0.463036% |
t: 50 | S: 0 , 0% | E: 0 , 0% | I: 219 , 0.00782143% | Q: 4221 , 0.15075% | R: 23560 , 0.841429% |
t: 60 | S: 0 , 0% | E: 0 , 0% | I: 23 , 0.000821429% | Q: 1186 , 0.0423571% | R: 26791 , 0.956821% |
t: 70 | S: 0 , 0% | E: 0 , 0% | I: 2 , 7.14286e-05% | Q: 352 , 0.0125714% | R: 27646 , 0.987357% |
t: 80 | S: 0 , 0% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 109 , 0.00389286% | R: 27891 , 0.996107% |
t: 90 | S: 0 , 0% | E: 0 , 0% | I: 0 , 0% | Q: 36 , 0.00128571% | R: 27964 , 0.998714% |
End:
imax : 17756imax %: 0.634143
```

Figure 6: Nízka hustota obyvateľstva d=20%, vzdialenosť d=2

```

t: 0 | S: 27543, 0.983679% | E: 455, 0.01625% | I: 2, 7.14286e-05% | Q: 0, 0% | R: 0, 0% |
t: 10 | S: 4565, 0.163036% | E: 22400, 0.8% | I: 1034, 0.0369286% | Q: 1, 3.57143e-05% | R: 0, 0% |
t: 20 | S: 15, 0.000535714% | E: 4863, 0.173679% | I: 17287, 0.617393% | Q: 5835, 0.208393% | R: 0, 0% |
t: 30 | S: 0, 0% | E: 44, 0.00157143% | I: 9245, 0.330179% | Q: 18308, 0.653857% | R: 403, 0.0143929% |
t: 40 | S: 0, 0% | E: 0, 0% | I: 2054, 0.0733571% | Q: 12932, 0.461857% | R: 13014, 0.464786% |
t: 50 | S: 0, 0% | E: 0, 0% | I: 257, 0.00917857% | Q: 4322, 0.154357% | R: 23421, 0.836464% |
t: 60 | S: 0, 0% | E: 0, 0% | I: 18, 0.000642857% | Q: 1262, 0.0450714% | R: 26720, 0.954286% |
t: 70 | S: 0, 0% | E: 0, 0% | I: 2, 7.14286e-05% | Q: 339, 0.0121071% | R: 27659, 0.987821% |
t: 80 | S: 0, 0% | E: 0, 0% | I: 0, 0% | Q: 94, 0.00335714% | R: 27906, 0.996643% |
t: 90 | S: 0, 0% | E: 0, 0% | I: 0, 0% | Q: 22, 0.000785714% | R: 27978, 0.999214% |
End:
imax : 17287imax %: 0.617393

```

Figure 7: Vysoká hustota obyvateľstva $d=70\%$ vzdialenosť $d=2$

5.2.2 Efekty pravdepodobnosti styku s nákazou

Parameter pravdepodobnosti styku s nákazou p_e nám pomáha simulovať opatrenia, ktoré sa týkajú zamedzovania šíreniu vírusu ako je napr. dodržiavanie hygieny a nosenie rúšok. S väčšou pravdepodobnosťou šírenia sa opäť zrýchľuje priebeh vírusu a aj počet maximálnych nakazených ľudí.

```

t: 0 | S: 18322, 0.995761% | E: 76, 0.00413043% | I: 2, 0.000108696% | Q: 0, 0% | R: 0, 0% |
t: 10 | S: 17654, 0.959457% | E: 660, 0.0358696% | I: 85, 0.00461957% | Q: 1, 5.43478e-05% | R: 0, 0% |
t: 20 | S: 16607, 0.902554% | E: 1035, 0.05625% | I: 582, 0.0316304% | Q: 175, 0.00951087% | R: 1, 5.43478e-05% |
t: 30 | S: 15129, 0.822228% | E: 1468, 0.0797826% | I: 1057, 0.0574457% | Q: 715, 0.0388587% | R: 31, 0.00168478% |
t: 40 | S: 13535, 0.735598% | E: 1585, 0.0861413% | I: 1493, 0.0811413% | Q: 1365, 0.0741848% | R: 422, 0.0229348% |
t: 50 | S: 11855, 0.644293% | E: 1678, 0.0911957% | I: 1712, 0.0930435% | Q: 1966, 0.106848% | R: 1189, 0.0646196% |
t: 60 | S: 10021, 0.54462% | E: 1845, 0.100272% | I: 1812, 0.0984783% | Q: 2305, 0.125272% | R: 2417, 0.131359% |
t: 70 | S: 8095, 0.439946% | E: 1933, 0.105054% | I: 1986, 0.107935% | Q: 2515, 0.136685% | R: 3871, 0.21038% |
t: 80 | S: 6440, 0.35% | E: 1681, 0.0913587% | I: 2061, 0.112011% | Q: 2727, 0.148207% | R: 5491, 0.298424% |
t: 90 | S: 5212, 0.283261% | E: 1240, 0.0673913% | I: 1897, 0.103098% | Q: 2858, 0.155326% | R: 7193, 0.390924% |
End:
imax : 2088imax %: 0.113478

```

Figure 8: Parameter pravdepodobnosti styku s nákazou $p_e=0.2$

```

t: 0 | S: 18264, 0.992609% | E: 134, 0.00728261% | I: 2, 0.000108696% | Q: 0, 0% | R: 0, 0% |
t: 10 | S: 15958, 0.867283% | E: 2282, 0.124022% | I: 159, 0.0086413% | Q: 1, 5.43478e-05% | R: 0, 0% |
t: 20 | S: 12241, 0.665272% | E: 3718, 0.202065% | I: 1962, 0.10663% | Q: 479, 0.0260326% | R: 0, 0% |
t: 30 | S: 8204, 0.44587% | E: 4061, 0.220707% | I: 3581, 0.19462% | Q: 2494, 0.135543% | R: 60, 0.00326087% |
t: 40 | S: 4796, 0.260652% | E: 3416, 0.185652% | I: 4241, 0.230489% | Q: 4701, 0.255489% | R: 1246, 0.0677174% |
t: 50 | S: 2560, 0.13913% | E: 2252, 0.122391% | I: 3821, 0.207663% | Q: 5648, 0.306957% | R: 4119, 0.223859% |
t: 60 | S: 1498, 0.081413% | E: 1092, 0.0593478% | I: 2753, 0.14962% | Q: 5279, 0.286902% | R: 7778, 0.422717% |
t: 70 | S: 1083, 0.0588587% | E: 412, 0.0223913% | I: 1532, 0.0832609% | Q: 3919, 0.212989% | R: 11454, 0.6225% |
t: 80 | S: 962, 0.0522826% | E: 121, 0.00657609% | I: 708, 0.0384783% | Q: 2327, 0.126467% | R: 14282, 0.776196% |
t: 90 | S: 918, 0.0498913% | E: 48, 0.0026087% | I: 258, 0.0140217% | Q: 1190, 0.0646739% | R: 15986, 0.868804% |
End:
imax : 4261imax %: 0.231576

```

Figure 9: Parameter pravdepodobnosti styku s nákazou $p_e=0.5$

5.2.3 Efekty pravdepodobnosti nakazenia sa

Parameter pravdepodobnosti nákazy p_i nám pomáha simulovať infekčnosť samotného vírusu. Tento parameter v reálnom svete nemáme zatiaľ ako ovplyvniť. Môžeme však skúšať rôzne jeho hodnoty pre teoretické situácie. Keby sme mali vakcíny a boli by sme zaočkovaný p_i by bolo omnoho nižšie. Keby sme chceli

sledovať vírus v priemerne staršej populácii, tak by sme nastavili pi vyššie keďže vieme, že starí ľudia sú viac zraniteľní voči COVID-19.

```
t: 0 | S: 18322 , 0.995761% | E: 76 , 0.00413043% | I: 2 , 0.000108696% | Q: 0 , 0% | R: 0 , 0% |
t: 10 | S: 17654 , 0.959457% | E: 660 , 0.0358696% | I: 85 , 0.00461957% | Q: 1 , 5.43478e-05% | R: 0 , 0% |
t: 20 | S: 16607 , 0.902554% | E: 1035 , 0.05625% | I: 582 , 0.0316304% | Q: 175 , 0.00951087% | R: 1 , 5.43478e-05% |
t: 30 | S: 15129 , 0.822228% | E: 1468 , 0.0797826% | I: 1057 , 0.0574457% | Q: 715 , 0.0388587% | R: 31 , 0.00168478% |
t: 40 | S: 13535 , 0.735598% | E: 1585 , 0.0861413% | I: 1493 , 0.0811413% | Q: 1365 , 0.0741848% | R: 422 , 0.0229348% |
t: 50 | S: 11855 , 0.644293% | E: 1678 , 0.0911957% | I: 1712 , 0.0930435% | Q: 1966 , 0.106848% | R: 1189 , 0.0646196% |
t: 60 | S: 10021 , 0.54462% | E: 1845 , 0.100272% | I: 1812 , 0.0984783% | Q: 2305 , 0.125272% | R: 2417 , 0.131359% |
t: 70 | S: 8095 , 0.439946% | E: 1933 , 0.105054% | I: 1986 , 0.107935% | Q: 2515 , 0.136685% | R: 3871 , 0.21038% |
t: 80 | S: 6440 , 0.35% | E: 1681 , 0.0913587% | I: 2061 , 0.112011% | Q: 2727 , 0.148207% | R: 5491 , 0.298424% |
t: 90 | S: 5212 , 0.283261% | E: 1240 , 0.0673913% | I: 1897 , 0.103098% | Q: 2858 , 0.155326% | R: 7193 , 0.390924% |
End:
imax : 2088imax %: 0.113478
```

Figure 10: Parameter nakazenia sa $\pi=0.2$

```
t: 0 | S: 18264 , 0.992609% | E: 134 , 0.00728261% | I: 2 , 0.000108696% | Q: 0 , 0% | R: 0 , 0% |
t: 10 | S: 15958 , 0.867283% | E: 2282 , 0.124022% | I: 159 , 0.0086413% | Q: 1 , 5.43478e-05% | R: 0 , 0% |
t: 20 | S: 12241 , 0.665272% | E: 3718 , 0.202065% | I: 1962 , 0.10663% | Q: 479 , 0.0260326% | R: 0 , 0% |
t: 30 | S: 8204 , 0.44587% | E: 4061 , 0.220707% | I: 3581 , 0.19462% | Q: 2494 , 0.135543% | R: 60 , 0.00326087% |
t: 40 | S: 4796 , 0.260652% | E: 3416 , 0.185652% | I: 4241 , 0.230489% | Q: 4701 , 0.255489% | R: 1246 , 0.0677174% |
t: 50 | S: 2560 , 0.13913% | E: 2252 , 0.122391% | I: 3821 , 0.207663% | Q: 5648 , 0.306957% | R: 4119 , 0.223859% |
t: 60 | S: 1498 , 0.081413% | E: 1092 , 0.0593478% | I: 2753 , 0.14962% | Q: 5279 , 0.286902% | R: 7778 , 0.422717% |
t: 70 | S: 1083 , 0.0588587% | E: 412 , 0.0223913% | I: 1532 , 0.0832609% | Q: 3919 , 0.212989% | R: 11454 , 0.6225% |
t: 80 | S: 962 , 0.0522826% | E: 121 , 0.00657609% | I: 708 , 0.0384783% | Q: 2327 , 0.126467% | R: 14282 , 0.776196% |
t: 90 | S: 918 , 0.0498913% | E: 48 , 0.0026087% | I: 258 , 0.0140217% | Q: 1190 , 0.0646739% | R: 15986 , 0.868804% |
End:
imax : 4261imax %: 0.231576
```

Figure 11: Parameter nakazenia sa $\pi=0.5$

5.3 Závěry experimentovania

Bolo vykonaných 8 experimentov, ktoré ukázali rôzne výsledky za rôznych okolností, ktoré boli nastavené parametrami. Ďalšie experimenty by sa dali vykonať nastavovaním ďalších parametrov. Alebo aj upravením modelu a pridaním ďalších parametrov ako je vek človeka a počítali by sa pravdepodobnosti nakazenia aj s ním. Ďalšie možné rozšírenie môže byť aj ročné obdobie, keďže každému vírusu vyhovujú iné podmienky, v lete nie je chrípkové obdobie a v zime a na jeseň áno. Na to sú však potrebné ďalšie výskumy tohto vírusu pre jeho lepšie pochopenie.

6 Zhrnutie simulačných experimentov a záver

Štúdiom a experimentovaním na modeli boli ukázané dôsledky rôznych parametrov, ktoré predstavujú faktory reálneho sveta, ktoré hrajú rolu v boji proti pandémie COVID-19. Ukázalo sa že zavádzanie opatrení ako nosenie rúšok a dodržiavanie hygieny má zmysel pre zamedzenie šíreniu vírusu. Taktiež, že treba zavádzať opatrenia v každej krajine podľa toho aké sú u nich okolnosti, či už sa jedná o hustotu obyvateľstva alebo úrovni ich zdravotníckeho systému ako je napríklad dispozícia pľúcnych púmp či dostatok testov a zdravotníckeho personálu.

References

- [1] Computational model on COVID-19 Pandemic using Probabilistic Cellular Automata <https://arxiv.org/pdf/2006.11270.pdf>
- [2] WHO Declares COVID-19 a Pandemic <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7569573/>
- [3] Epidemiological, clinical and virological characteristics of 74 cases of coronavirus-infected disease 2019 (COVID-19) with gastrointestinal symptoms <https://gut.bmj.com/content/69/6/1002>
- [4] COVID-19 and the cardiovascular system <https://www.nature.com/articles/s41569-020-0360-5?fbclid=IwAR3TjvxiEtYQqNkpsPuEuuef94Gp2m4a89YFsubY2pw2Ft0xsSpxGZ18TmI>
- [5] Kidney disease is associated with in-hospital death of patients with COVID-19 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32247631/>
- [6] Immediate Psychological Responses and Associated Factors during the Initial Stage of the 2019 Coronavirus Disease (COVID-19) Epidemic among the General Population in China <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32155789/>
- [7] Presumed asymptomatic carrier transmission of COVID-19 <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2762028>
- [8] Estimation of the asymptomatic ratio of novel coronavirus infections (COVID-19) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32179137/>
- [9] COVID-19 outbreak on the Diamond Princess cruise ship: estimating the epidemic potential and effectiveness of public health countermeasures <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32109273/>
- [10] COVID-19 pandemic: perspectives on an unfolding crisis <https://bjssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bjs.11627>