

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



Modelování a simulace

Epidemiologické modely pomocí celulárných automatů

Tým: **B-TEAM PREMIUM**

Sova Damián (xsovad06)

Matej Bojnanský (xbojna01)

6.12.2020, Senica

Obsah

1. Úvod	3
1.1. Zdroje a autori.....	3
1.2. Overovanie validity modelu.....	3
2. Rozbor témy	3
2.1. Použité postupy.....	4
2.2. Popis pôvodov použitých metód/technológií.....	4
3. Konceptia – modelárske témy	4
4. Architektúra simulačného modelu/simulátoru.....	4
4.1. Mapovanie konceptuálneho modulu do simulačného modelu	5
4.2. Spustenie simulačného modelu	5
5. Podstata simulačných experimentov a ich priebeh.....	5
5.1. Experiment č. 1: Obmedzený pohyb bez rúšok.....	5
5.1.1. Záver prvého experimentu	6
5.2. Experiment č. 2: Obmedzený pohyb povinné rúška.....	6
5.2.1. Záver druhého experimentu	8
5.3. Experiment č. 3: Lockdown.....	8
5.3.1. Záver tretieho experimentu.....	9
6. Postup experimentovania.....	9
6.1. Experimenty	9
7. Zhrnutie simulačných experimentov a záver	9

1. Úvod

Práca modeluje a simuluje pandémiu SARS-CoV-2. Srdcom je implementovaný celulárny automat, ktorý tvorí model systému šírenia pandémie. Vďaka tomuto modelu vieme pozorovať rýchlosť šírenia pandémie, testovať obmedzenia vlády, ako sú nosenie rúšok, obmedzenie pohybu, podujatí, kultúrneho a spoločenského života, prípadne lockdown. Cieľom práce je testovať významnosť vládnych opatrení a obmedzení, ktoré sa stali súčasťou našich životov s príchodom svetovej pandémie. Chceme dokázať, že šírenie sa dá kontrolovať a experimentami ukázať možné priebehy pandémie v súvislosti s použitými opatreniami.

1.1. Zdroje a autori

Projekt vypracovali študenti Damián Sova a Matej Bojnanský. K technickej časti boli použité zdroje z predmetu Modelovanie a simulácie na VUT FIT. Ako zdroj faktov a vedomostí slúžilo viacero odborných článkov a portálov z internetu:

- <http://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mbe.2021008>
- https://www.researchgate.net/publication/228819056_Using_Cellular_Automata_to_Simulate_Epidemic_Diseases
- https://www.researchgate.net/publication/341496727_Analysis_of_the_Transmissibility_Change_of_2019-Novel_Coronavirus_Pneumonia_and_Its_Potential_Factors_in_China_from_2019_to_2020
- <https://www.worldometers.info/coronavirus/>
- <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/cursos/papers/Sirakoulis2000.pdf>
- <https://www.livescience.com/face-masks-eye-protection-covid-19-prevention.html>

1.2. Overovanie validity modelu

Validitu modelu sme určili pomocou porovnania výsledkov simulácií so skutočnými dátami, kvôli zmene skutočných opatrení počas vývoja štatistik nie je možné presne určiť validitu modelu. V našom modeli sa podmienky nemenia počas simulácie, preto sa výsledky musia odlišovať, no priebeh je logicky vysvetliteľný.

2. Rozbor témy

Koncom roku 2019 prepukla v globálnom meradle nová epidémia koronárnej pneumónie, ktorá mala obrovský vplyv na životy ľudí na celom svete.

Prostredníctvom jednoduchšej matematickej analýzy modelu SEIRD je možné získať výpočtový vzorec pre reprodukčné číslo infekčných chorôb. Hlavnou myšlienkou je rozdeliť populáciu na vnímavé osoby podľa ich aktuálneho statusu: nákazlivé osoby S(susceptible) , osoby vystavené infekčnej osobe E(exposed), infekčné osoby I(infectious) a osoby mŕtve D(dead).

Model počíta s odhalením infekčnosti osoby, jeho následným uvedením do izolácie a šancou na vyzdravenie v skoršej dobe a jeho následnou 3 mesačnou imunitou. V

reakcii na túto epidémiu sú v súčasnosti najefektívnejšie opatrenia v prípade absencie vakcíny obmedzenie pohybu populácie, včasná detekcia, izolácia a liečba. Čím sú opatrenia prísnejšie, tým rýchlejšie je možné kontrolovať pandémiu. Šanca že sa človek nakazí od okolia je pri nosení rúšok 2.95 %, bez nich až 17%, šanca na to že zomrie, keď bude pozitívny sú 3%, percentá vychádzajú z celosvetových celkových štatistík. Model počíta s možnosťou pohybu nakazenej osoby, ktorý môžeme regulovať vstupnými parametrami modelu.

2.1. Použité postupy

Pri programovaní simulačného modelu sme postupovali nasledovne:

- Vytvorili sme triedu s potrebnými atribútmi reprezentujúcu jedinca
- Vytvorili sme triedu riadiacu celú simuláciu obsahujúcu simulačné premenné
- Do nej sme umiestnili štvorcovú mapu s jedincami
- Do mapy sme náhodne umiestnili infikovaných jedincov, ktorí následne šíria chorobu
- Šírenie končí ak nezostal nikto kto by nákazu prenášal, prípadne sa vykoná zadaný maximálny počet iterácií(dní)

2.2. Popis pôvodov použitých metód/technológií

Na implementovanie modelu boli použité štandardné funkcie a triedy jazyka C++ so štandardom C++17. Boli vytvorené 2 vlastné triedy, ktoré implementujú správanie celulárneho automatu. Jedna reprezentuje osobu, ktorá žije v simulácii, *Cell*. Druhá reprezentuje samotnú simuláciu, obsahuje všetku funkcionálnu a informácie o priebehu simulácie, *Simulation*.

3. Konceptcia – modelárske témy

Dynamický model založený na tradičnom infekčnom modeli. Na základe vývoja pandémie a určitých opatrení delíme populáciu na nákazlivých, vystavených nákaze, infekčných, vyliečených resp. imúnnych a mŕtvych. Nakazený jedinec je priemerne odhalený až od 5 dňa po nákaze. Z dôvodu rozdielu v ľudskej imunite voči pandémii sa človek bez odhalenia(nie je pod lekárskeho dohľadom) zotaví po skončení infekčného obdobia, čo je priemerne 9 dní a len 3% končia smrťou. Z dôvodu opatrení a opatrnosti ľudí bude miera nákazy klesať, no v modeli to pre nepatrné rozdiely zanedbáme. Hospitalizovaný pacient(detekovaná nákaza s úspešnosťou 60%), môže byť predčasne vyliečený s úspešnosťou 15%, ak nie je po skončení nákazy získava imunitu a v 3% zomiera. Imunita končí po 90 dňoch a jedinec môže byť opäť nakazený.

4. Architektúra simulačného modelu/simulátoru

Pri spustení sa do mapy náhodne umiestni daný počet nakazených buniek, ktoré budú chorobu šíriť. Následne sa vstúpi do cyklu, ten v každej iterácii prechádza cez všetky nakazené bunky a chorobu šíri medzi svoje [8-okolie](#) (Moore neighborhood) a robí aj náhodné výlety po mape. Cyklus beží pokým nedosiahneme stanovený počet dní alebo sa bunky nebudú mať od koho nakaziť, nezostal nikto infikovaný. Každá bunka vie nakaziť svojich susedov s určitou šancou, ktorá sa odvíja od okolností. Ak je bunka nakazená po určitom počte dní choroba končí dvomi scenármi, vyliečením, z čoho vychádza s imunitou alebo smrťou bunky.

4.1. Mapovanie konceptuálneho modulu do simulačného modelu

Trieda *Simulation* znázorňuje mapu osôb, po ktorej sa pandémia rozširuje. Uchováva aktuálne štatistiky o stave pandémie. Obsahuje bunky (osoby), ktoré sú implementované v triede *Cell*. Táto trieda uchováva atribúty osoby a jej stav.

4.2. Spustenie simulačného modelu

Najskorej musíme model prekompilovať príkazom `make`, potom spustiť z danými argumentami.

```
./automat -MAX_DAYS -INITIAL_INFECTED_NUM -TRIPS_PER_DAY -  
TRIP_MAX_DISTANCE
```

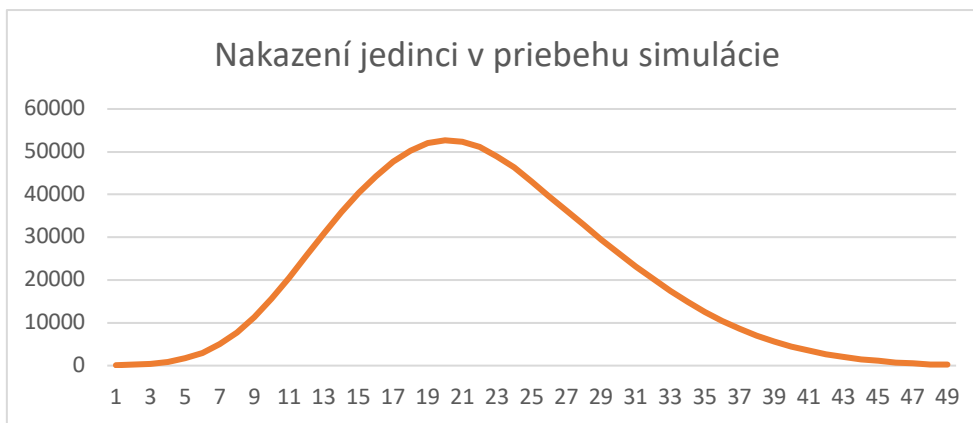
5. Podstata simulačných experimentov a ich priebeh

Cieľom experimentov bolo preveriť validitu modelu, a spätne upraviť konštanty modelu, aby bol model čo najpodobnejší skutočnosti. Ďalším krokom bolo spúšťať simulácie s rôznymi vstupnými hodnotami, aby sme preverili význam jednotlivých opatrení a ich vplyv na šírenie ochorenia COVID-19.

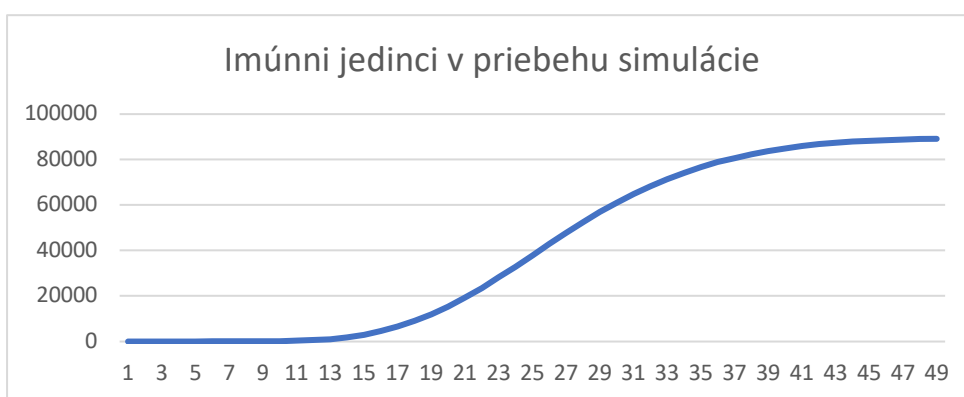
5.1. Experiment č. 1: Obmedzený pohyb bez rúšok

Cieľom experimentu je poukázať, ako by vyzeral priebeh, ak by síce bol obmedzený pohyb, športový, kultúrny aj spoločenský život, no nebolo by povinné nosenie rúšok. [Simulácia](#) je spustená nad štvorcovou maticou 450x450 jedincov (202 500), jedinec sa počas dňa priemerne stretne s 14 ľuďmi. Ďalšie vstupné hodnoty:

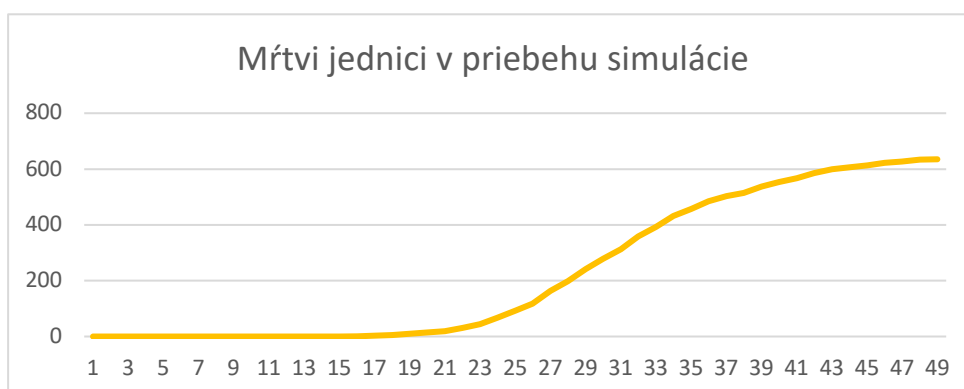
- | | |
|---------------------------------|-----|
| – Maximálny počet dní: | 200 |
| – Počiatočný počet nakazených: | 40 |
| – Počet výletov jedinca za deň: | 8 |
| – Maximálna vzdialenosť výletu: | 6 |
| – Počet dní simulácie: | 49 |



Nakazený pribúdajú exponenciálne, maximum je v 20. deň, 52678 nakazených, spomali sa to umiestnením jedincov do izolácie a následným získaním imunity. S rastúcim počtom imúnnych začne krivka klesať.



Krivka imúnnych jedincov začína rásť až po vyliečení prvých nakazených. Na konci má hodnotu 89137.



Počet mŕtvych začne rásť až počas liečenia nakazených jedincov. Celkom umiera 635 jedincov.

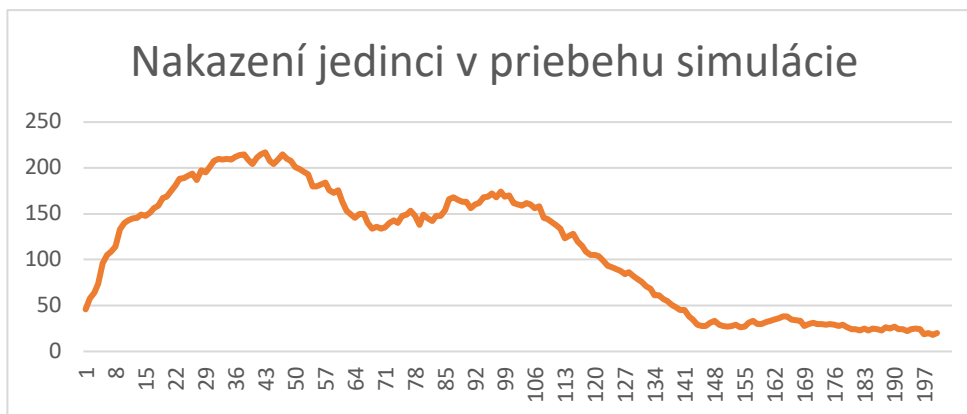
5.1.1. Záver prvého experimentu

Zistili sme, že pri nechránení sa maskou má šírenie exponenciálny priebeh a už po 20. dňoch dosahuje maximum, nakazilo by sa 26% obyvateľov. No počet mŕtvych predstavuje len 0.31% z celkového počtu obyvateľov. Poukázali sme, že absencia rúšok má rapidný vplyv na šírenie vírusu.

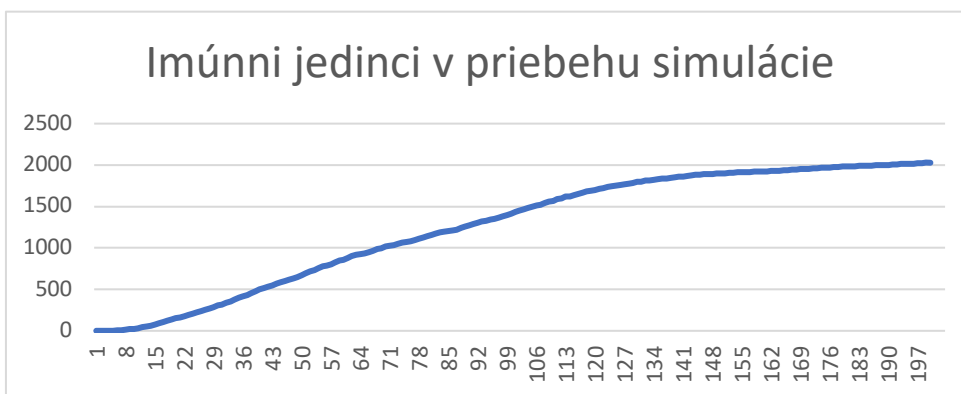
5.2. Experiment č. 2: Obmedzený pohyb povinné rúška

Tento experiment simuluje aktuálnu situáciu u nás(Česká Republika, Slovensko). Povinnosť nosenia rúšok v potenciálnych miestach stretnutia, uzatvorenie inštitúcií, obmedzený šport, kultúra a všetky sféry života, ktoré obmedzujú počet stretnutí na minimum. Cieľom je čo najpresnejšie napodobniť aktuálnu situáciu. Simulácia je spustená nad štvorcovou maticou 450x450 jedincov(202 500), jedinec sa počas dňa priemerne stretne s 14 ľuďmi. Ďalšie vstupné hodnoty:

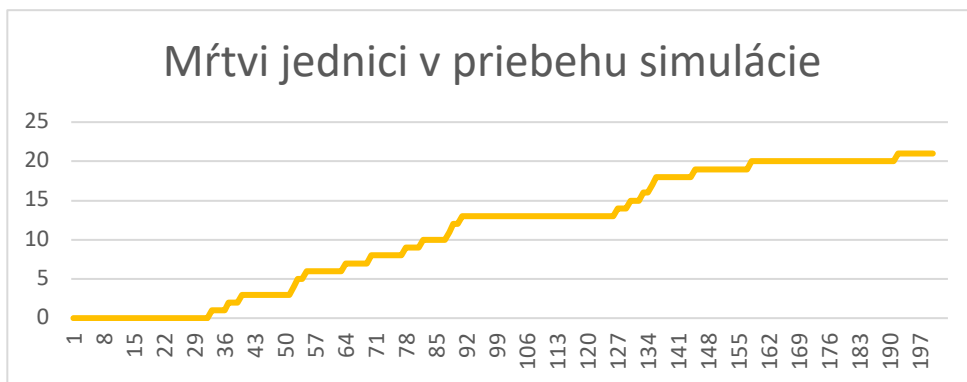
- Maximálny počet dní: 200
- Počiatočný počet nakazených: 40
- Počet výletov jedinca za deň: 8
- Maximálna vzdialenosť výletu: 6
- Počet dní simulácie: 200



Nakazení pribúdajú celkom rýchlo, maximum je ale v 46. deň a to 209 nakazených, počet začína klesať, ale približne po mesiaci prichádza menšia „druhá vlna“. Tá nastúpa do hodnoty 170 v 100. deň a následným rastúcim počtom imúnnych začne krivka opäť klesať.



Krivka imúnnych jedincov začína rásť až po vyliečení prvých nakazených. Na konci dosiahne hodnotu 2028.



Počet mŕtvych začne rásť až počas liečenia nakazených jedincov. Celkom umiera 21 jedincov.

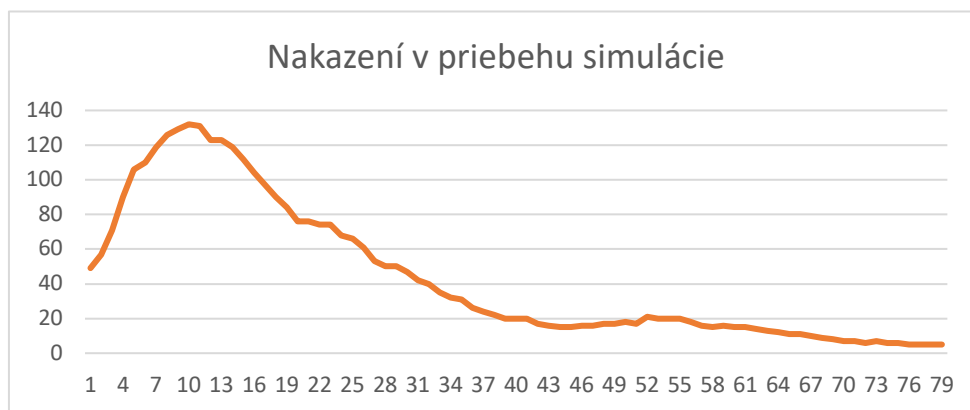
5.2.1. Záver druhého experimentu

Druhý experiment potvrdzuje význam nosenia rúšok, priebeh šírenia má dve maximá, ktoré vznikli v dvoch „vlnách“. Maximum prvej vlny je o 26 dní posunuté a 260x menšie ako v prvom experimente. Počet mŕtvych je 31x menší a to 0.0104% počtu obyvateľov. Podarilo sa nám ukázať, aký význam má povinnosť nosenia rúšok a v takmer presne napodobniť aktuálnu situáciu. Reálny počet mŕtvych na Slovensku k dnešnému dňu, t.j. 7.12.2020 je 0,018% podľa svetového portálu www.worldometer.info.

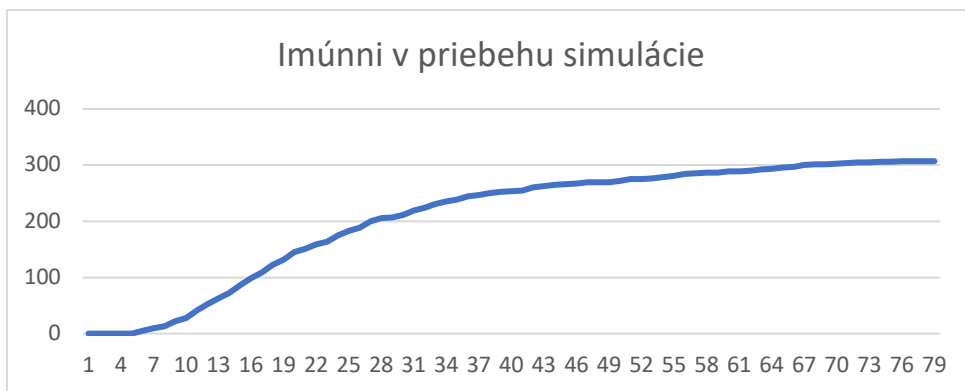
5.3. Experiment č. 3: Lockdown

Cieľom experimentu je demonštrovať silu obmedzenia pohybu a tým aj stretnutiu sa s ostatnými jedincami a to len na nevyhnutné stretnutia. Simulácia je spustená nad štvorcovou maticou 450x450 jedincov(202 500), jedinec sa počas dňa stretne s 8 ľuďmi, čo predstavuje domácnosť + nevyhnutné stretnutia(obchod, lekár..). Ďalšie vstupné hodnoty:

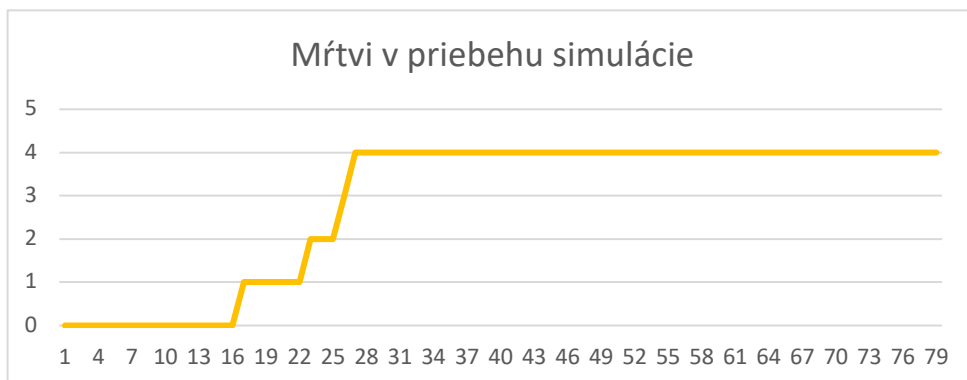
- Maximálny počet dní: 200
- Počiatočný počet nakazených: 40
- Počet výletov jedinca za deň: 0
- Maximálna vzdialenosť výletu: 0
- Počet dní simulácie: 79



Nakazení pribúdajú celkom rýchlo, maximum je však v 11. deň a to 132 nakazených, počet začína klesať a následným rastúcim počtom imúnnych začne krivka klesať a približuje sa k 0.



Krivka imúnnych jedincov začína rásť až po vyliečení prvých nakazených, rovnako ako v predchádzajúcich experimentoch. Na konci dosiahne hodnotu 307.



Celkovo umierajú len 4 jedinci.

5.3.1. Záver tretieho experimentu

Tretí experiment potvrdzuje významnú silu lockdownu, priebeh šírenia má len jediné maximum. Maximum je už v 11. dni, čo je o 9 dní skorej ako v prvom experimente a je 400x menšie. Počet mŕtvych je takmer zanedbateľný z celkového pohľadu a to 0.0019% počtu obyvateľov.

6. Postup experimentovania

Experimenty spočívali v spustení simulácia so zvolenými vstupnými hodnotami a pozorovaním výstupných hodnôt. Na základe týchto hodnôt, zhodnotiť silu a významnosť daných opatrení, ktoré reprezentovali konkrétny experiment. Pre väčšiu presnosť sme simuláciu spustili viackrát a výsledné hodnoty spriemerovali.

6.1. Experimenty

Pri každom experimente je zhrnutý jeho cieľ a či bol dosiahnutý, prípadne popísané prečo sme dané hodnoty získali.

7. Zhrnutie simulačných experimentov a záver

Experimentami bola overená a potvrdená validita daného modelu. Použité získané konštanty zo štúdií a štatistík sa potvrdili ako pravdivé a podarilo sa pomocou nich napodobniť reálnu situáciu vo svete. Môže sa zdať, že úmrtnosť v experimentoch je veľmi nízka. Je to spôsobené skutočnosťou, akým [procesom](#) jedinec prechádza po nakazení. Po nakazení sa jedinec 4 dni voľne pohybuje, od 5 dňa môže byť nákaza odhalená so 60% šancou až do konca nákazy. Ak je ak je nákaza detekovaná, každý deň je 15% šanca, že jedinec predčasne vyzdravie, teda nevzťahuje sa naňho 3% šanca úmrtnosti, ako pri konci nákazy.