

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta informačních technologií

IMS - Modelování a Simulace

1. Epidemiologické modely pomocí celulárních automatů

1. Úvod

V tejto práci je riešená implementácia a simulácia celulárneho automatu [Zdroj 1, str.278], ktorý má skúmať epidemiologické modely. Zmyslom tejto práce je skúmať rýchlosť šírenia jedného konkrétneho vírusu (SARS-CoV-2 [Zdroj 2]). Cieľom výskumu je zistiť ako rýchlosť šírenia daného vírusu ovplyvňujú rôzne efekty, napr. používanie ochranných prostriedkov, karanténne opatrenia,... V experimentoch sú znázornené aj situácie v ktorých má vírus zvýšenú nákazlivosť alebo úmrtnosť, taktiež je znázornená aj situácia bez opatrení predchádzajúcich nákaze.

1.1 Autori

Autori práce sú Juraj Sloboda a Jakub Kočalka, študenti Vysokého učení technické, Fakulta informačních technologií. Za odbornú pomoc a konzultácie patrí poďakovanie Petrovi Škvárovi, študentovi Molekulární biologie a biochemie organismů na Karlovej univerzite v Prahe.

1.2 Validita

Experimentovanie prebiehalo na základe prieskumu vedeckých článkov a výsledky testovania boli s nimi porovnávané [zdroje 3,4,5]. Experimenty ktoré sú len návrhom boli riešené za pomoci konzultácií s odborníkom.

2. Rozbor tématu a použitých metod/technológií

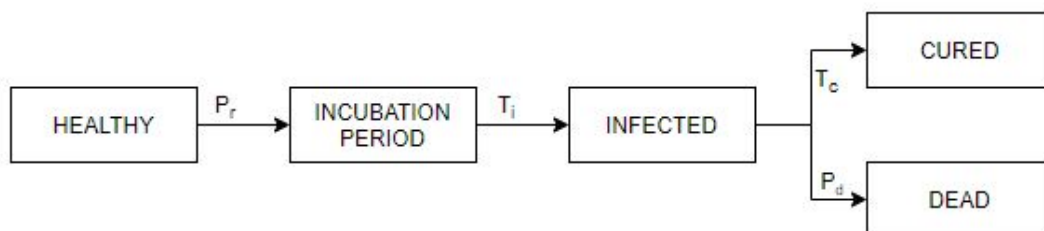
Vírusy sú parazity, ktoré sa môžu reprodukovať len vo vnútri živých buniek, pretože nemajú vlastný proteosyntetický aparát. V tejto práci sa budeme venovať konkrétne vírusu SARS-CoV-2 [zdroj 2]. Tento vírus postihuje hlavne dýchací systém. Vírus sa prenáša kvapôčkami sekrétu pri kašli, kýchaní a rozprávaní. Ohrozuje osoby, ktoré sú v blízkom alebo dlhšie trvajúcim kontakte s nakazeným. Na predmetoch sa prežíva len v rámci niekoľkých desiatok minút prípadne hodín. Pri nakazení vírusom sa pacient dostáva do inkubačnej doby vírusu, ktorá trvá 2-14 dní. Úmrtnosť vírusu je približne 3% a zvýšená je hlavne u ľudí vyššej vekovej kategórie a ľudí so závažnými zdravotnými problémami dýchacích ciest. Približne 20-30% ľudí je asymptomatických, čím nevykazujú žiadne príznaky pri nakazení vírusom. Priemerný čas, ktorý prežíva vírus v tele organizmu po inkubačnej dobe a človek je vtedy nákazlivý pre ostatných je 2-3 týždne. Na rýchlosť šírenia vírusu v istej populácii ľudí má vplyv používanie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, dodržiavanie bezpečných vzdialeností medzi ľuďmi a zároveň prípadná izolácia nakazených (resp. aj všetkých ktorý s nimi sú v osobnom kontakte).

2.1 Použité postupy

Na implementáciu simulátoru bol použitý implementačný objektovo orientovaný jazyk C++, ktorý umožňuje rýchle vykonávanie výpočtov a tým aj celej simulácie. Výstup

simulátoru sú dáta v CSV formáte na základe ktorých sa dá spraviť graf pre vizualizáciu rýchlosti nákazy.

3. Koncepte - modelárska témata



Každá bunka môže dosahovať 5 stavov. Počiatočný stav je HEALTHY. Každý deň počas času t má pravdepodobnosť P_r že sa nakazí a prejde do stavu INCUBATION PERIOD. Túto pravdepodobnosť ovplyvňuje počet nakazených susedných buniek, ochranné prostriedky, izolácia bunky (resp. susedných buniek). Zo stavu INCUBATION PERIOD prechádza do INFECTED po čase T_i ktorý je z intervalu zadaneho užívateľom (pri experimentoch je používaný interval $\langle 2, 14 \rangle$, keďže skúmame len jeden konkrétny vírus). V stave INCUBATION PERIOD a INFECTED ovplyvňuje P_r susedných HEALTHY buniek. zo stavu INFECTED má každý deň počas T_c šancu zadávanú užívateľom na prechod do stavu DEAD. Ak za čas T_c bunka neprejde do stavu DEAD tak prechádza do stavu CURED. Stav DEAD a CURED už neovplyvňujú susedné HEALTHY bunky. V stave INFECTED môže byť bunka izolovaná, kedy taktiež neovplyvňuje susedné HEALTHY bunky (karanténne opatrenia pre nakazených ľudí)

3. Koncepte - implementační témata

V každej bunke automatu sa nachádza práve jedna osoba, ktorá má 8 susedných buniek, ktoré predstavujú kontakt s inými ľuďmi. Každá osoba je v určitom stave, v prípade nakazenia má každá konkrétny čas inkubácie a dobu trvania choroby. Pri každej bunke je istá šanca na úmrtie na vírus. Pri každom kontakte s inou osobou (bunkou) je tiež počítané s pravdepodobnosťou používania ochranných prostriedkov a dodržiavania bezpečnej vzdialenosti, ktoré redukujú pravdepodobnosť nákazy podľa skúmaných zdrojov [zdroj 6]. Taktiež je možné zaviesť 2 typy karantény, jeden len pre nakazenú bunku, kde je 80% šanca na úplnú izoláciu bunky (podľa výzkumu zo zdroju 6 je približne 20% ľudí asymptomatických a nevedia že majú vírus, takže neprebehne u nich ani izolácia) a druhý typ pre danú nakazenú bunku a zároveň všetkých ktorý snou boli v kontakte (okolitých 8 buniek).

4. Architektura simulačného modelu/simulátoru

Architektúra simulátora sa skladá z 2 tried: cell a cellMatrix. Cell predstavuje jednu a uchováva o nej údaje: stav v ktorom sa nachádza, čas inkubácie vírusu a čas choroby. Trieda cellMatrix je dvojrozmerné pole triedy cell predstavujúce oblasť na ktorej simuláciu vykonávame. Dané pole ukladá triedy cell s ktorých každá má svoje unikátne x a y súradnice. Taktiež sa v triede cellMatrix nachádza funkcia ktorá využíva pravidlá celulárneho automatu na generovanie nových stavov pre triedu cell v čase.

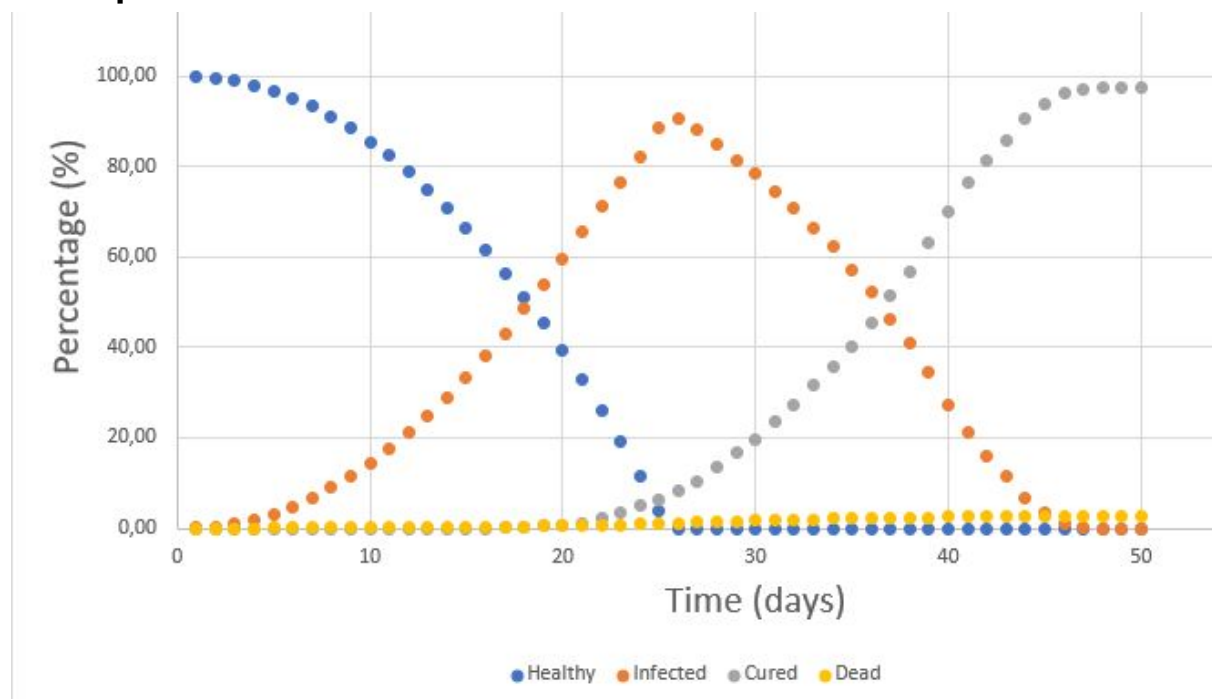
5. Podstata simulačných experimentů a jejich průběh

Cieľom našich experimentov je zistiť rýchlosť šírenia daného vírusu. Taktiež je cieľ zistiť ako na rýchlosť šírenia vplývajú rôzne opatrenia (ochranné prostriedky, karanténa, dodržiavanie odstupov medzi ľuďmi). Ďalším cieľom je zistiť ako ovplyvní vír jeho prípadná mutácia, kde by mohol dosiahnuť napr. vyššej úmrtnosti.

5.1 Postup experimentování

Počas experimentov v každom stave celulárneho automatu zaznamenávame percentuálne zastúpenie všetkých stavov buniek a na konci daného experimentu z daných údajom vykreslíme graf, ktorý porovnávame zo skúmanými zdrojmi. Všetky experimenty sú vykonané na vzorke 50x50 buniek (kvôli obmedzeniam na serveri merlin nie je možné na väčšej), prebiehajú v čase 50 dní a umiestnená je len jedna nakazená bunka priamo do stredu našej vzorky. Tiež bola všade nastavená doba liečby na 14-21 dní, a doba inkubácie 2-14 dní (tam kde je počítané s inkubačnou dobou) [zdroj 7].

5.2 Experiment 1

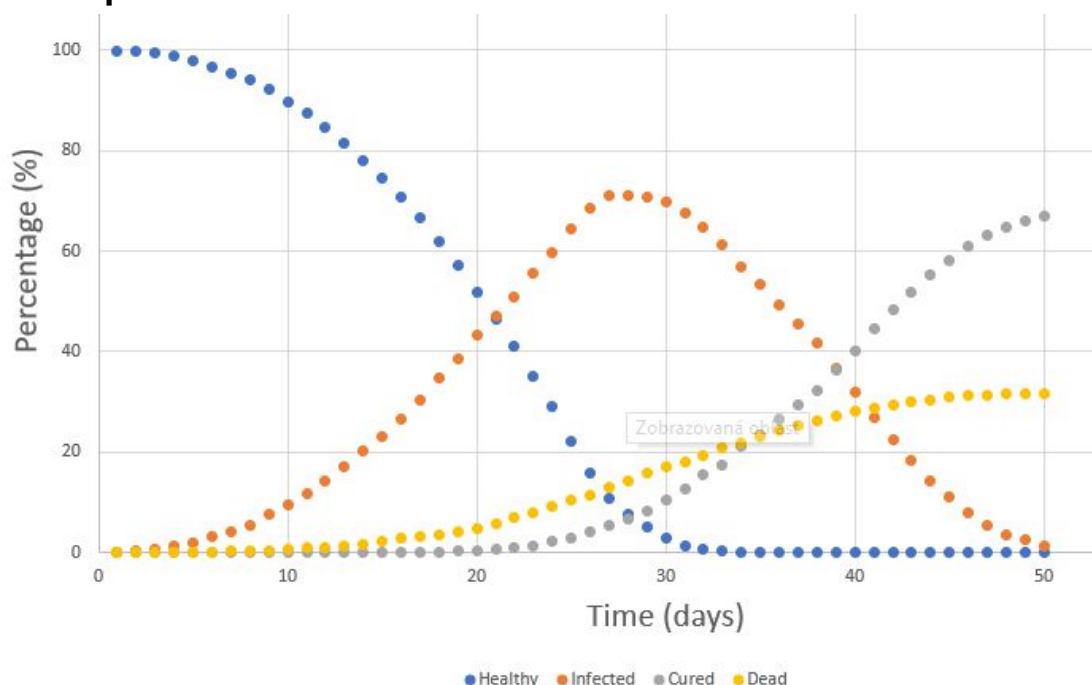


Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% (stačí ak má bunka v jeden deň jedného nakazené suseda a nakazí sa tiež). Úmrtnosť je na 3%. Nie je počítané so žiadnymi ochrannými opatreniami.

V experimente je možné vidieť, že polovica populácie je nakazená približne v 18. deň a celá populácia v 25.

Experiment je vykonaný hlavne na porovnávanie s neskoršími experimentmi, kde sú používané ochranné prostriedky. V experimente nie je vôbec počítané s inkubačnou dobou vírusu.

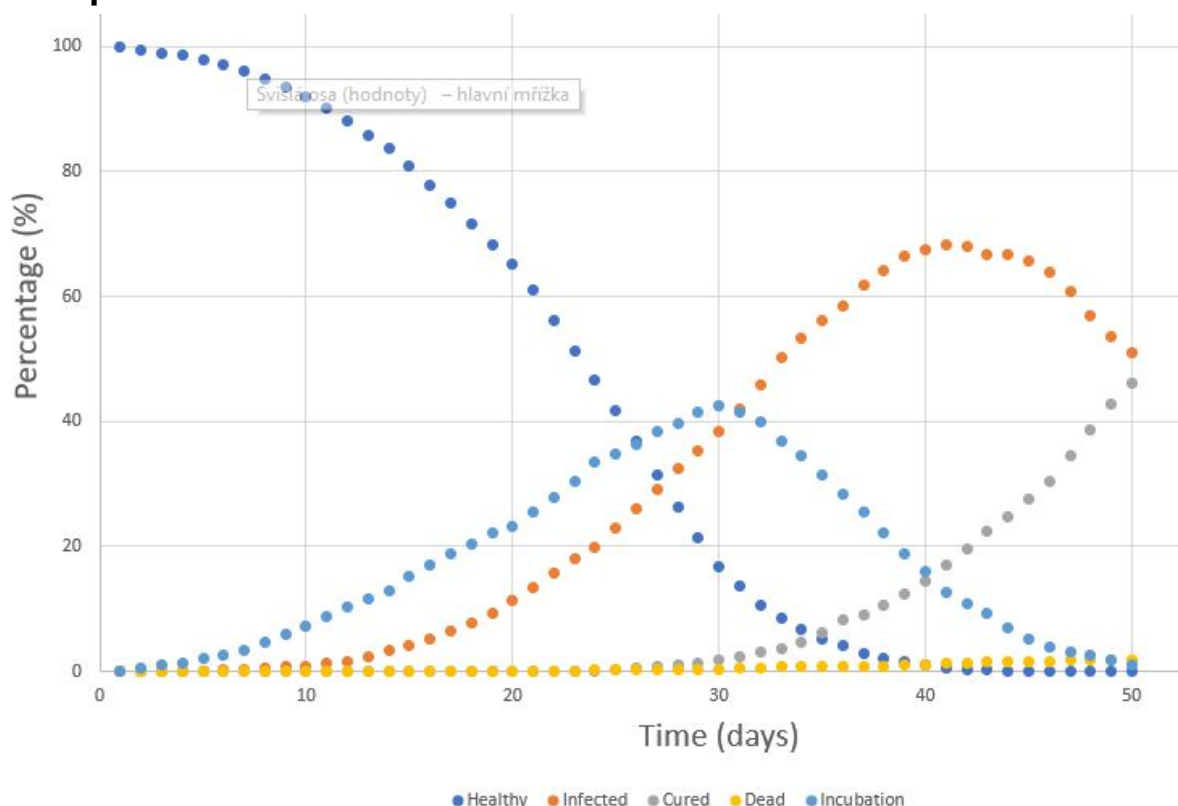
5.3 Experiment 2



Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 50% (stačí ak má bunka v jeden deň jedného nakazené suseda a nakazí sa tiež). Úmrtnosť je na 30%. Nie je počítané so žiadnymi ochrannými opatreniami.

Experiment je vykonaný len pre simulovanie vírusu pri jeho smrteľnej mutácii, pričom počítame že sa jeho nákazlivosť zníži o polovicu ale jeho smrteľnosť 10-násobne. Oproti experimentu 1 sa polovica populácie nakazila asi o 2 dni neskôr a celá populácia až takmer o 10 dní. Spôsobené je to nižšou nákazlivosťou vírusu a zároveň jeho vysokou úmrtnosťou, nakoľko mŕtve bunky už vírus neprenášajú.

5.4 Experiment 3

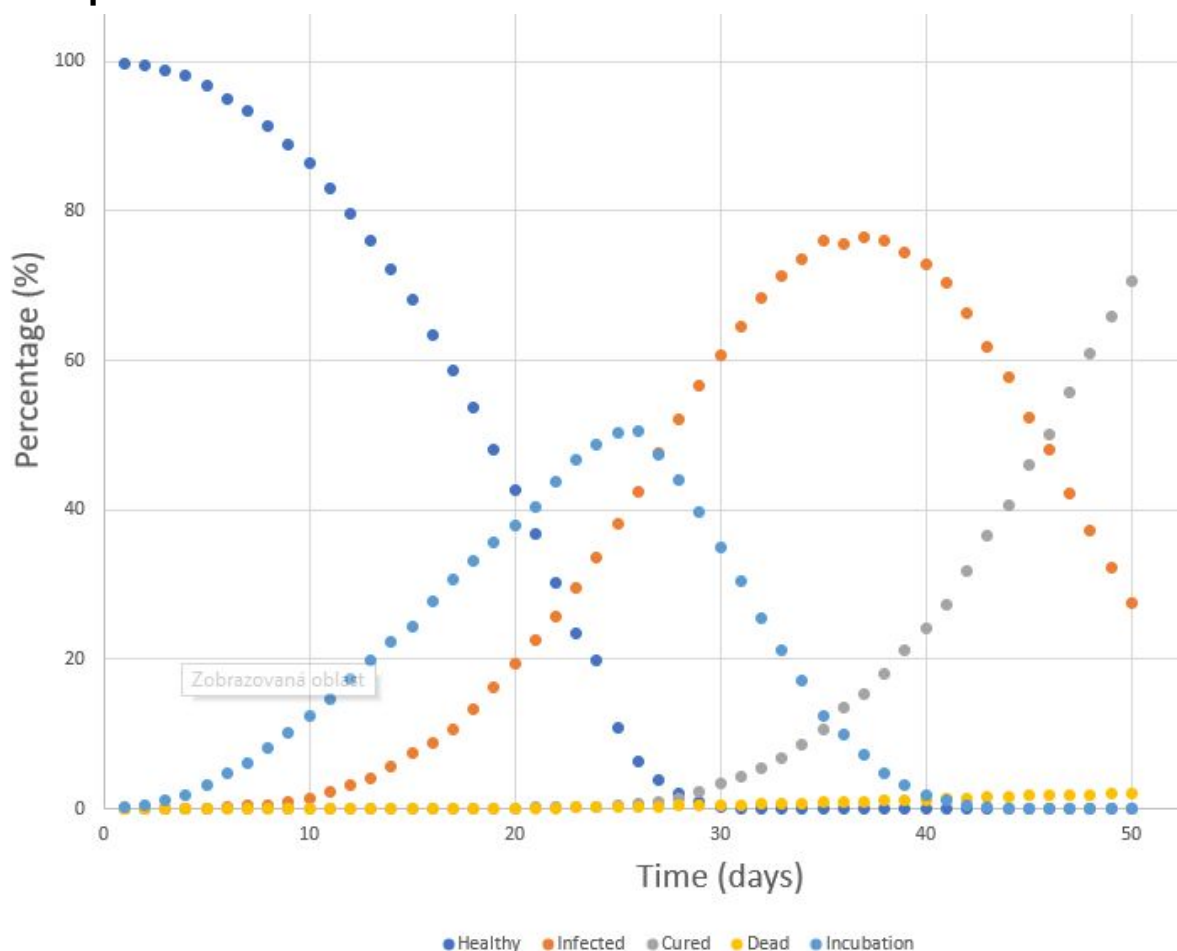


Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 30% u buniek v inkubačnej dobe (v inkubačnej dobe je nákazlivosť vírusu nižšia). Úmrtnosť je na 3%. Nie je počítané so žiadnymi ochrannými opatreniami.

Oproti experimentu 1, kde nie je počítané s inkubačnou dobou vírusu a jeho zníženou nákazlivosťou počas tejto doby, sa polovica populácie nakazila o 5 dní neskôr a celá populácia bola zasiahnutá až o takmer 20 dní neskôr.

Experiment je podobne ako experiment 1 hlavne vykonaný pre porovnanie s ďalšími experimentmi aby bol zistený vplyv ochranných prostriedkov na rýchlosť šírenia vírusu. Tlež bol vykonaný na ukázanie vplyvu zníženej nákazlivosti počas doby inkubácie

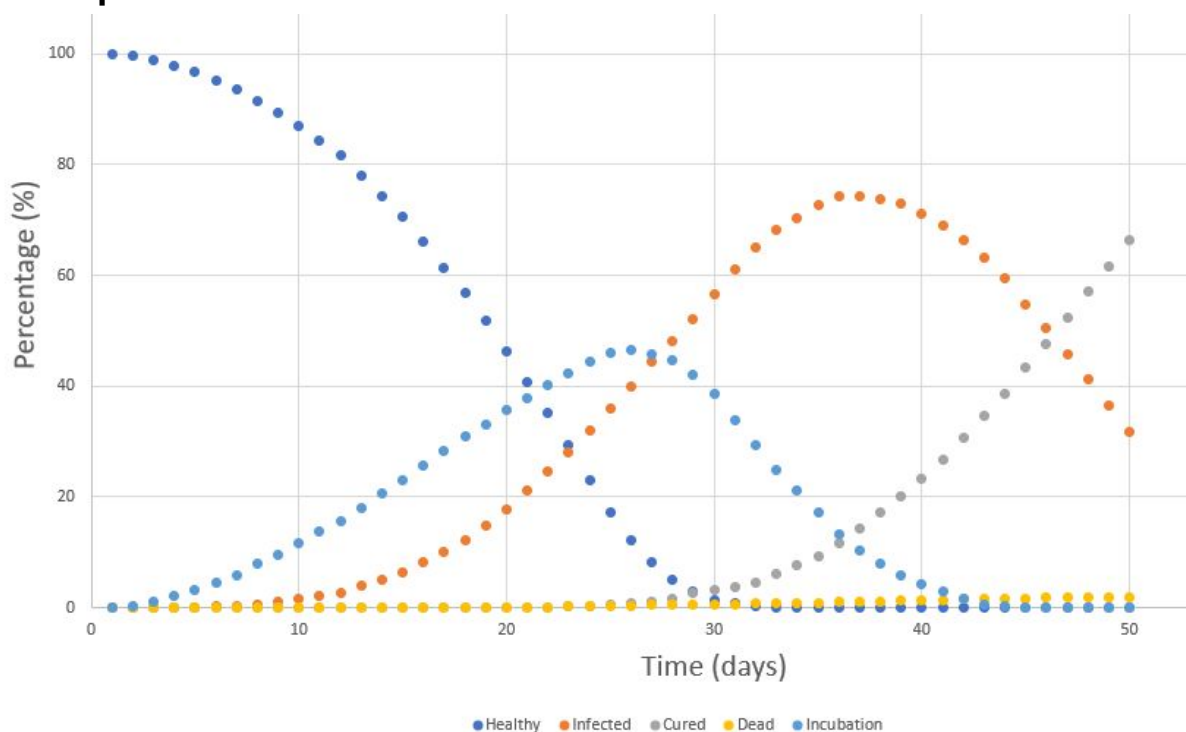
5.5 Experiment 4



Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 70% u buniek v inkubačnej dobe. Úmrtnosť je na 3%. Je počítané že ľudia (bunky) majú pravdepodobnosť 10% na nosenie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, a pravdepodobnosť 10% na dodržanie bezpečnej vzdialenosti.

Polovica populácie je nakazená približne medzi 18. a 19. dňom a celá populácia približne v 31. Oproti experimentu 1 je to len mierne zlepšenie, spôsobené miernym znížením nákazlivosti v inkubačnej dobe a veľmi nízkou šancou na ochranné opatrenia (10% na ochranné prostriedky a dodržiavanie vzdialenosti je veľmi málo). Experiment je porovnávaný s výsledkami so zdroju 4, kde boli výsledky podobné a takto nízke bezpečnostné opatrenia nemali takmer žiadny účinok.

5.6 Experiment 5



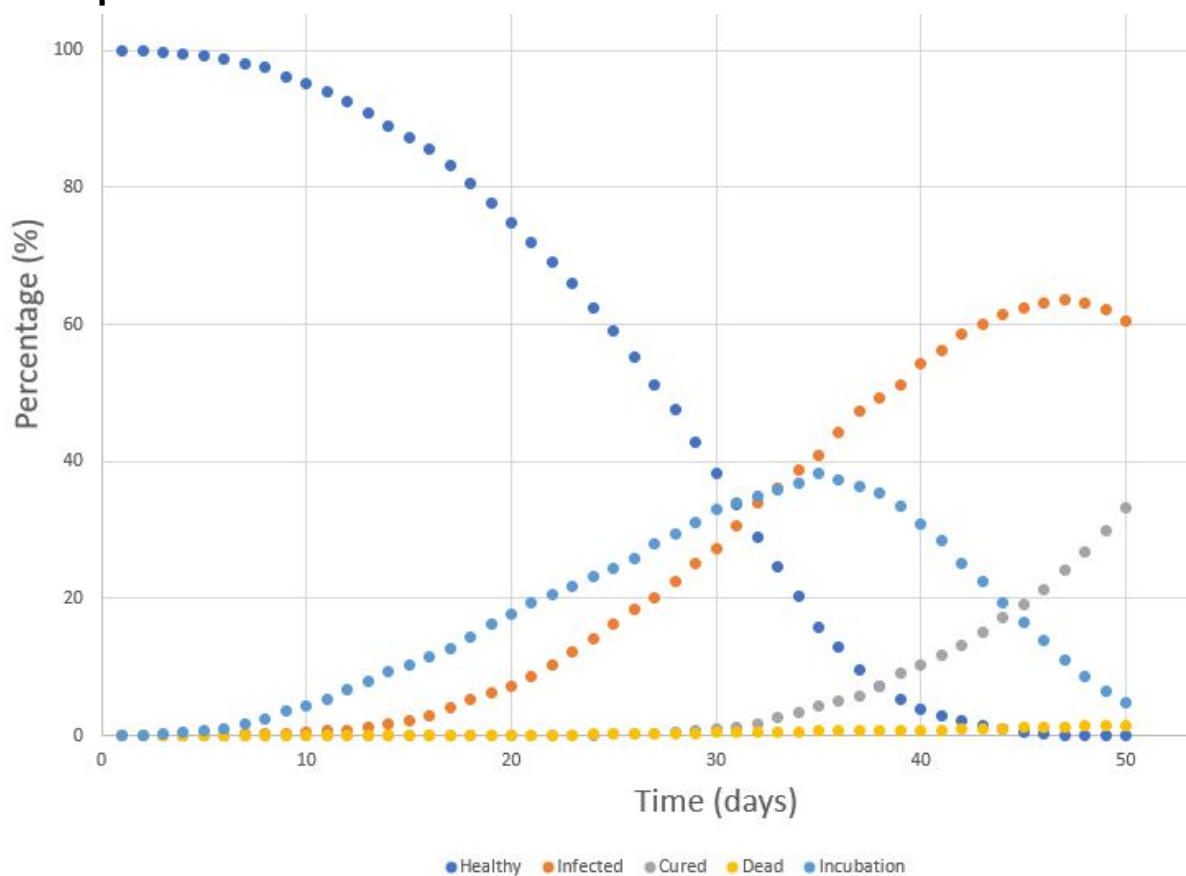
Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 70% u buniek v inkubačnej dobe. Úmrtnosť je na 3%. Je počítané že ľudia (bunky) majú pravdepodobnosť 25% na nosenie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, a pravdepodobnosť 25% na dodržanie bezpečnej vzdialenosti.

Polovica populácie je nakazená približne 20. deň a celá populácia približne v 33.

Oproti experimentu 1 a 4 je to zlepšenie a dokazujeme že vírus sa šíri o niečo pomalšie, čím viac ľudí používa ochranné prostriedky, prípadne dodržiava bezpečné vzdialenosti.

Experiment je taktiež porovnávaný s výsledkami so zdroju 4, kde oproti predošlému experimentu zaznamenali výraznejšie zlepšenie ako sme zaznamenali my.

5.7 Experiment 6

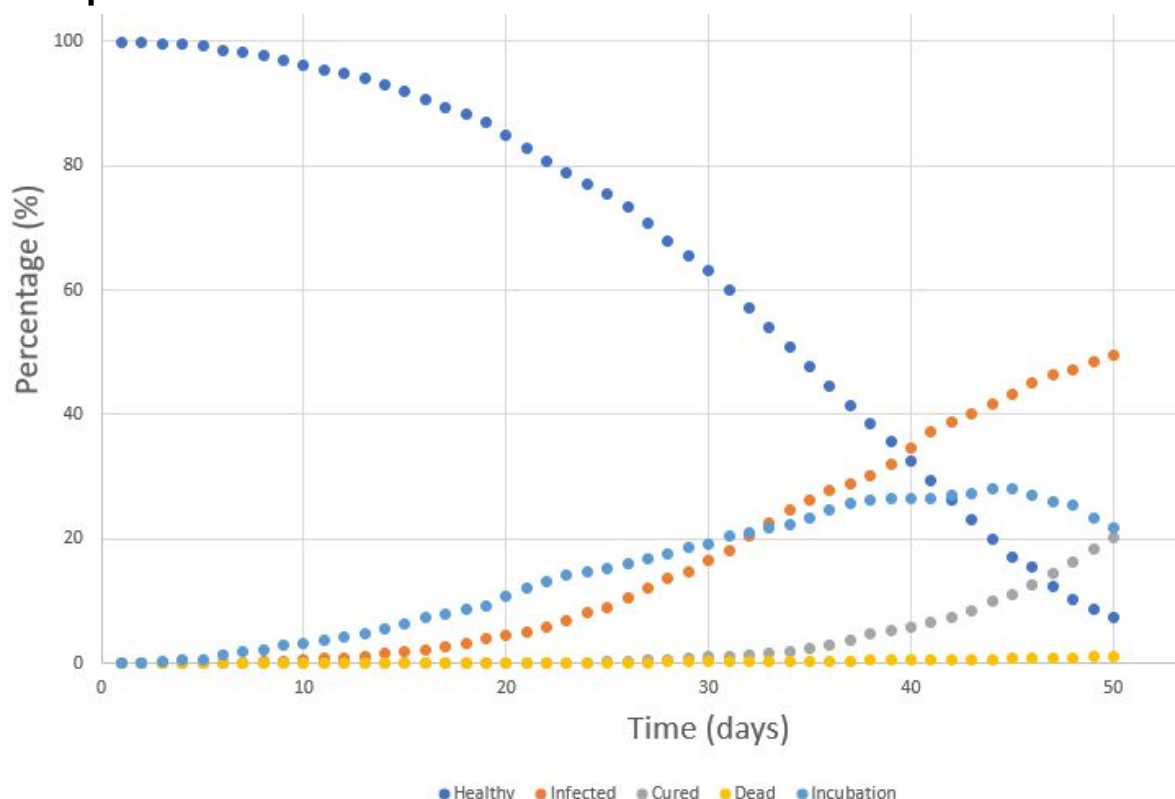


Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 70% u buniek v inkubačnej dobe. Úmrtnosť je na 3%. Je počítané že ľudia (bunky) majú pravdepodobnosť 50% na nosenie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, a pravdepodobnosť 50% na dodržanie bezpečnej vzdialenosti.

Polovica populácie je nakazená približne 27. deň a celá populácia približne v 48. Oproti experimentom 1, 4 a 5 je to výrazné zlepšenie a tým zaznamenávame už výrazné spomalenie v rýchlosti šírenia vírusu.

Výsledky tohto experimentu taktiež porovnávame s výsledkami so zdroju 4, kde taktiež zaznamenali výrazné zlepšenie oproti predchádzajúcim 2 experimentom.

5.8 Experiment 7



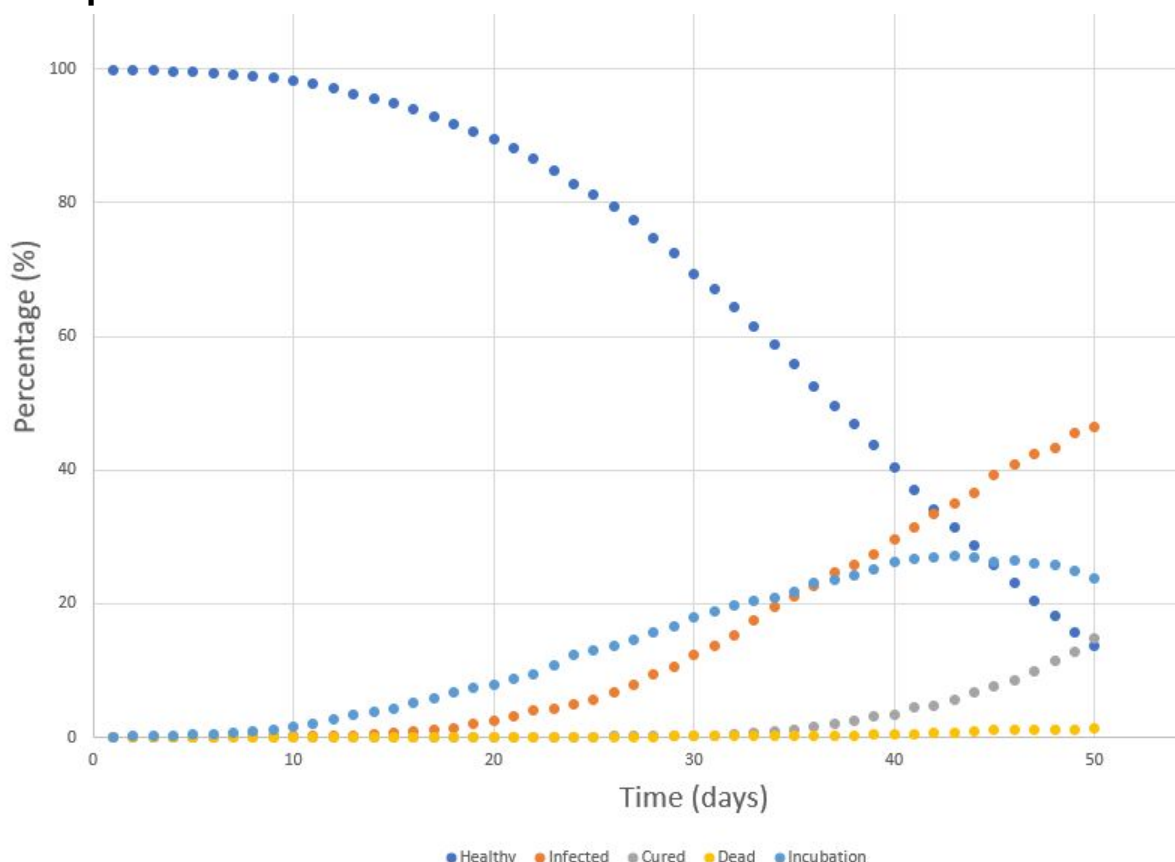
Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 70% u buniek v inkubačnej dobe. Úmrtnosť je na 3%. Je počítané že ľudia (bunky) majú pravdepodobnosť 100% na nosenie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, a pravdepodobnosť 50% na dodržanie bezpečnej vzdialenosti.

Polovica populácie je nakazená približne 34. deň a nakazenia celej populácia za daných 50 dní ani nedosiahneme, v 50 deň je približne 7% ľudí stále zdravých. Experiment má ukázať ideálnu momentálnu situáciu v našej oblasti (SR, ČR,...), kde pri hocijakom stretnutí by obaja ľudia mali mať nasadené rúška (100% pravdepodobnosť) a v istých interiérových priestoroch dodržiavali bezpečné vzdialenosti (50% pravdepodobnosť).

Oproti predchádzajúcim experimentom (viď hlavne 4 a 5) je vidno výrazné spomalenie šírenia vírusu.

Experiment avšak ešte neráta so žiadnymi karanténnymi opatreniami. Tie sú však vykonané v ďalších experimentoch, ktoré budú s týmto porovnávané.

5.9 Experiment 8

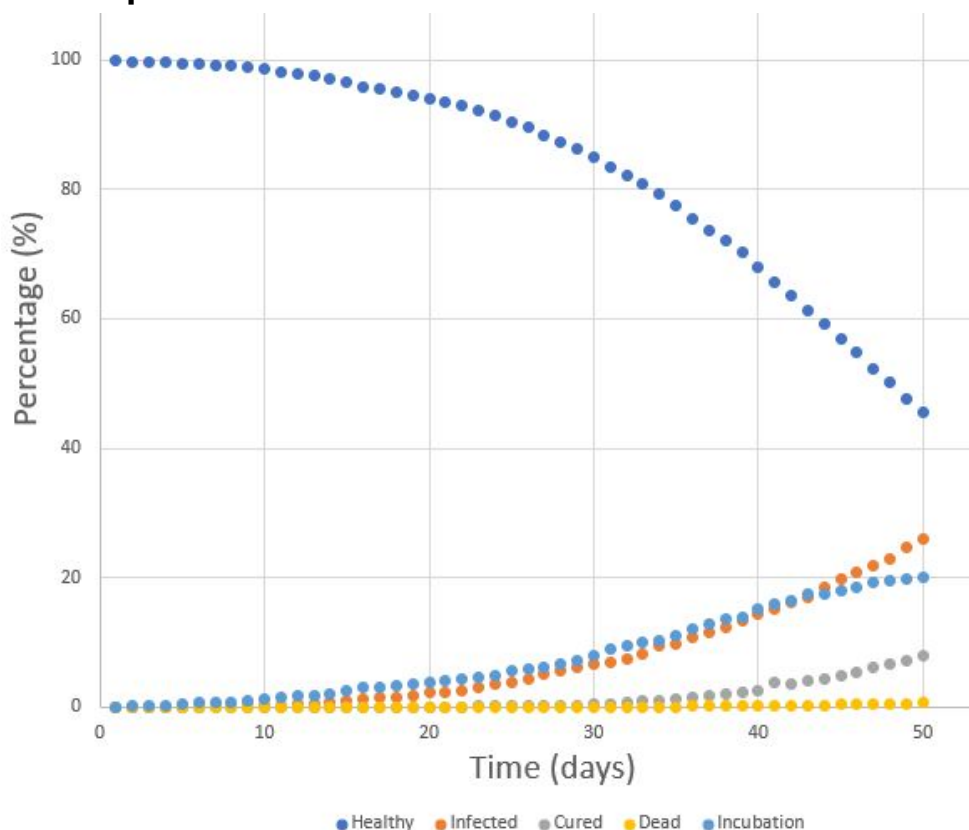


Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 70% u buniek v inkubačnej dobe. Úmrtnosť je na 3%. Je počítané že ľudia (bunky) majú pravdepodobnosť 100% na nosenie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, a pravdepodobnosť 50% na dodržanie bezpečnej vzdialenosti. Je počítané taktiež s karanténou pre nakazené bunky (akonáhle sa prejaví nákaza, nie v inkubačnej dobe)

Polovica populácie je nakazená približne 37. deň, v 50 deň je približne 14% ľudí stále zdravých.

Experiment dokazuje že ak sa u nakazeného človeka vyskytnú príznaky daného vírusu, je izolovaný od ostatných a tým už neprenáša vírus do ďalších buniek až kým nie je opäť zdravý. Tento typ karantény nie je veľmi účinný nakoľko nakazený človek prenáša vírus aj v inkubačnej dobe, prípadne podľa zdroja je približne 20-30% asymptomatických, čím sa u nich nevyskytujú žiadne príznaky, takže o prítomnosti vírusu často nevedia a stále ho môžu prenášať. Napriek tomu je ale oproti experimentu 7 aj tak vidno mierne spomalenie v rýchlosti šírenia vírusu.

5.10 Experiment 9



Pri tomto experimente je nastavená šanca nákazy na 100% u nakazených buniek a 70% u buniek v inkubačnej dobe. Úmrtnosť je na 3%. Je počítané že ľudia (bunky) majú pravdepodobnosť 100% na nosenie ochranných prostriedkov dýchacích ciest, a pravdepodobnosť 50% na dodržanie bezpečnej vzdialenosti. Je počítané taktiež s karanténou pre nakazené bunky (akonáhle sa prejaví nákaza, nie v inkubačnej dobe) a zároveň aj pre bunky, ktoré boli v kontakte s nakazenou bunkou (8 okolitých buniek)

Polovica populácie je nakazená približne 48. deň, v 50 deň je približne 45% ľudí stále zdravých.

Experiment ukazuje efektívnejšie riešenie karanténnych opatrení, kde sú izolovaný aj ľudia (bunky) ktoré prišli do kontaktu s nakazenou bunkou. Stále však nie je úplne zamedzené šíreniu vírusu z dôvodov ako sú uvedené v experimente č.8

Oproti karanténemu riešeniu s experimentu 8 je toto riešenie výrazne efektívnejšie.

5.11 Závěry experimentů

Bolo prevedených 9 experimentov, 1. a 2. hlavne na porovnávanie rýchlosti šírenia vírusu, 2. na prípadnú smrteľnú mutáciu vírusu, 4., 5. a 6. pre porovnanie s vedeckým článkom, kde nám vyšli dosť podobné výsledky. 7., 8. a 9. pre ideálne opatrenia na výrazné zníženie šírenie vírusu.

Pri všetkých sme hlavne porovnávali časový údaj nakazenia 50% populácie a 100% populácie (pri posledných 3 experimentoch sme 100% ani nedosiahli).

Experiment	50%	100%
1	18	25
2	20	34
3	23	44
4	19	31
5	20	33
6	27	48
7	34	-
8	37	-
9	48	-

6. Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V tomto projekte sme implementovali celulárny automat a za jeho pomoci sme vytvorili 9 experimentov na základe ktorých sme zisťovali rôzne vplyvy na rýchlosť šírenia vírusu SARS-CoV-2. Zistili sme že najideálnejšia je úplná izolácia nakazených jedincov a zároveň tých ktorý s nimi sú v kontakte. Výrazný vplyv má aj používanie ochranných prostriedkov dýchacích ciest a dodržiavanie bezpečných vzdialeností.

Zdroje:

1. Peringer P., Hrubý M., Modelování a simulace, dostupné na <https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/cfs.php.cs?file=%2Fcourse%2FIMS-IT%2Flectures%2FIMS-4.pdf&cid=13998>
2. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, dostupné na https://en.wikipedia.org/wiki/Severe_acute_respiratory_syndrome_coronavirus_2
3. Epidemic Modelling Using Cellular Automata, dostupné na https://www.researchgate.net/publication/228966629_Epidemic_Modelling_Using_Cellular_Automata
4. Simulating COVID-19 with Cellular Automata, dostupné na <https://towardsdatascience.com/simulating-covid-19-with-cellular-automata-aeb820910a9>
5. Epidemiologem snadno a rychle - Martin Šmíd, ÚTIA AV ČR, videozáznam přednášky dostupný na <https://www.youtube.com/watch?v=yRxe-QycdUE>
6. Your Mask Cuts Own Risk, Rick Kushman, dostupné na <https://www.ucdavis.edu/coronavirus/news/your-mask-cuts-own-risk-65-percent/>
7. How Long Is the Incubation Period for the Coronavirus?, dostupné na <https://www.healthline.com/health/coronavirus-incubation-period>
8. Virus, dostupné na <https://en.wikipedia.org/wiki/Virus>