

EPIDEMICKÝ MODEL SIR ROZŠÍRENÝ O POPULAČNÚ DYNAMIKU

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Epidemický model SIR simuluje šírenie nákazlivej choroby v populácii. V rámci behu simulácie sa členovia populácie delia do troch skupín, tradične nazývaných „susceptible“, „infected“ a „recovered“. Pred spustením simulácie je do populácie zavedených niekoľko jedincov, ktorí sú nositeľom choroby, zvyšok populácie je náchylných na ochorenie, nevyskytujú sa tu jedinci s prirodzenou imunitou. Imunitu môže jedinec získať až po prekonaní choroby. Získaná imunita je trvalá, do konca behu simulácie sú jedinci voči opätovnému nakazeniu odolní. Simulácia končí v momente, keď sa v populácii nenachádza jediný nakazený jedinec.

MOTIVÁCIA A MODELOVANÝ PROBLÉM

Základný model SIR predpokladá uzavretú populáciu, nevyskytujú sa tu pôrody, úmrtia alebo pohyb jedincov mimo modelovaný rámec populácie. Tento model si kladie za cieľ rozšíriť základný model SIR o populačnú dynamiku. Populácia je modelovaná v čase, model počíta so zánikom a vznikom nových jedincov v rámci behu simulácie. Pridaním populačnej dynamiky napomáhame realistikosti modelu, vytvoríme podmienky k tomu, aby trvanie epidémie nebolo obmedzené momentom, keď sa všetci jedinci stanú imúnni. Tým, že do modelu začleníme pôrody, zabezpečíme epidémiu trvalý prísun obetí.

Na modeli budeme analyzovať citlivosť jednotlivých vstupných parametrov na priebeh epidémie. Poznanie toho, ako model reaguje na rôzne vstupné hodnoty, nám umožní lepšie predpokladať vývoj a koniec trvania epidémie. Pri analýze výsledkov sa budeme sústrediť na čas potrebný na zastavenie šírenia epidémie.

POPIS MODELU

Model nadstavuje model epiDEM¹ z knižnice modelov NetLogo, ktorý reprezentuje klasický epidemický model SIR. Na počiatku simulácie má každý jedinec 5% šancu byť inicializovaný ako nositeľ choroby. Jedinci sa pohybujú náhodným smerom rýchlosťou jeden krok za jednu časovú jednotku. V momente, keď príde neinfikovaná osoba do kontaktu s infikovanou tým, že sa stane jedným z jej ôsmich susedov, má šancu byť nakazená. Pravdepodobnosť nakazenia je ako parameter zadávaná užívateľom. Infikovaná osoba má šancu byť uzdravená po uplynutí doby potrebnej na uzdravenie. Tá je spolu s pravdepodobnosťou uzdravenia taktiež zadávaná užívateľom. Zafarbenie jedinca udáva momentálny stav jeho zdravia. Bieli farba reprezentuje neinfikovaných jedincov, červená infikovaných a zelená uzdravených.

Model obsahuje nasledovné parametre zadávané užívateľom:

INITIAL-PEOPLE (50 - 400): celkový počet jedincov v populácii na začiatku simulácie.

MAX-AGE (10 – INITIAL-PEOPLE): maximálna doba, ktorej sa dožíva jedinec. Kvôli potrebám pri inicializácii počiatočného stavu simulácie je maximum obmedzené hodnotou INITIAL-PEOPLE. Presnejšie vysvetlenie je popísané nižšie.

INFECTION-CHANCE (10 - 100): pravdepodobnosť prenosu infekcie na ďalšieho jedinca.

RECOVERY-CHANCE (10 - 100): pravdepodobnosť uzdravenia jedinca v danú časovú jednotku.

AVERAGE-RECOVERY-TIME (1 – MAX-AGE): čas potrebný na uzdravenie jedinca determinovaný normálnym rozložením so stredom v AVERAGE-RECOVERY-TIME s odchýlkou rovnou jednej štvrtine

¹ Yang, C. and Wilensky, U. (2011). NetLogo epiDEM Basic model.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/epiDEMBasic>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL

AVERAGE-RECOVERY-TIME. Odchýlka zodpovedá rozdielom v genetických predispozíciach a imunitnom systéme jednotlivých jedincov.

BIRTH-DEATH-RATE (1 – 5): počet jedincov, ktorí zahynú, resp. ktorí sa narodia za jednu časovú jednotku. Počet úmrtí a narodení sa vždy rovná, celkový počet osôb v populácii zostáva v priebehu celej simulácie rovnaký.

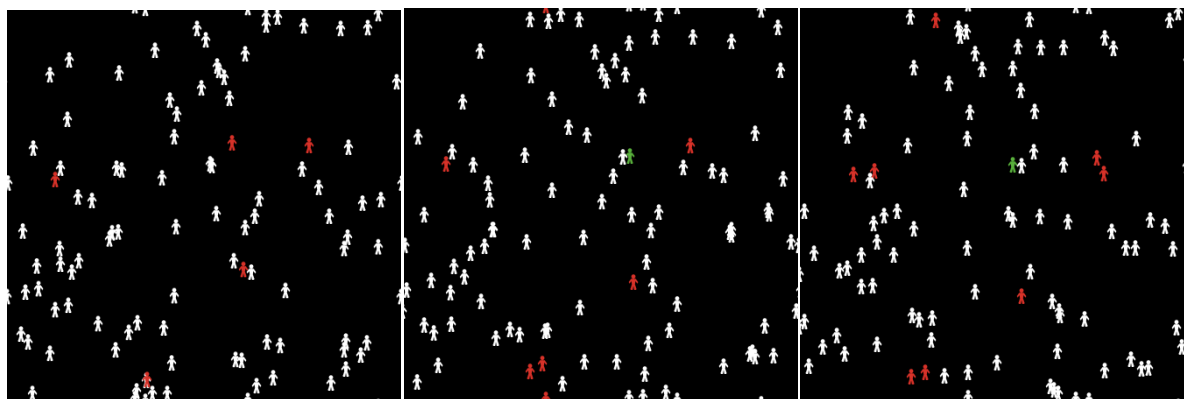
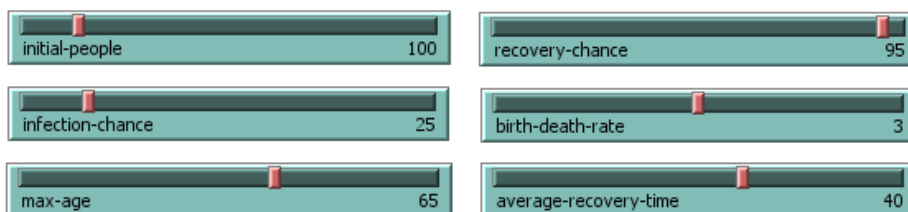
Priebeh simulácie možno sledovať na nasledovnom grafe:

POPULATIONS: udáva počet infikovaných jedincov a súčet uzdravených a neinfikovaných jedincov v danú časovú jednotku.

Do modelu epiDem sme pridali premennú vlastnú danému jedincovi, ktorá udáva jeho vek. S každou časovou jednotkou je táto premenná inkrementovaná. Pre zjednodušenie definujeme iniciálny vek jednotlivých členov populácie na začiatku simulácie týmto spôsobom: prvý jedinec má vek rovný MAX-AGE, každý ďalší člen má iniciálny vek o jedna nižší. Tieto podmienky nám pomôžu odlišiť novo narodených jedincov od jedincov zo začiatku simulácie a zároveň nedopustia, aby sa v populácii vyskytovali jedinci s vekom vyšším ako MAX-AGE. Funkcia, ktorá slúži na odoberanie členov z populácie, funguje týmto spôsobom: nájde množinu jedincov, ktorí sú v danej populácii najstarší a odoberie jedného z nich, pri BIRTH-DEATH-RATE vyššom ako jedna je tento proces opakovaný niekoľko krát po sebe. Vytváranie nových členov prebieha obdobným spôsobom ako vo funkcii „setup-people“ z modelu epiDem, s tým rozdielom, že vek jedinca je inicializovaný na nulu.

ILUSTRÁCIA BEHU SIMULÁCIE

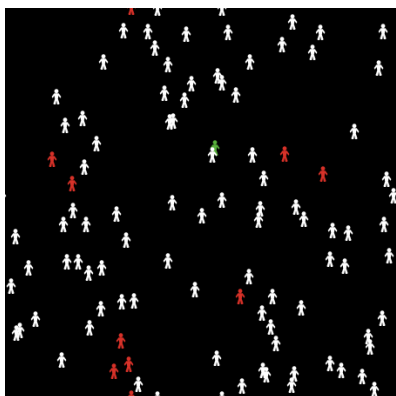
Simulácia prebiehala s týmito hodnotami vstupných parametrov:



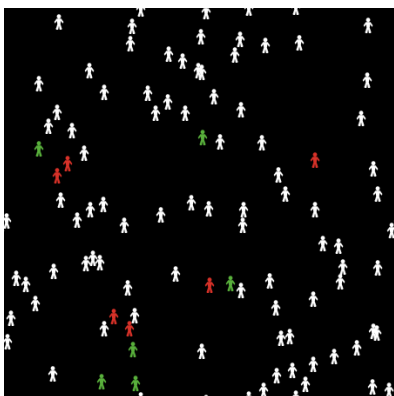
1. Do populácie sme vložili
5 infikovaných osôb

2. Infekcia sa preniesla na dve nové obete,
jedna z infikovaných osôb bola uzdravená.

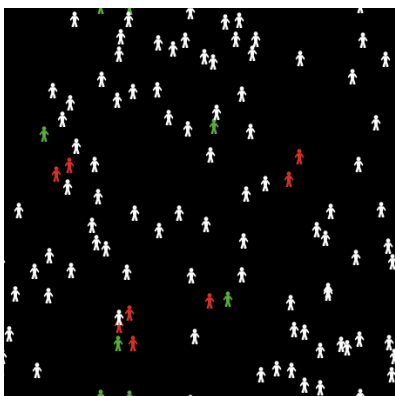
3. Ďalšie dve osoby nakazené.



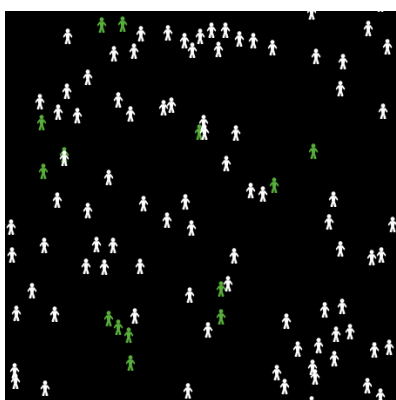
4. Nové dve obete nakazené.



5. Väčšina osôb z prvého a druhého kroku je uzdravená.



6. Nakazené dve nové osoby



7. Všetci jedinci sú uzdravení.

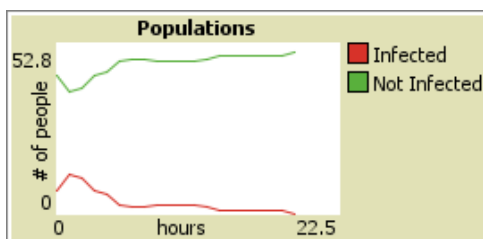
ANALÝZA CITLIVOSTI PARAMETROV

Citlivosť parametrov budeme sledovať vzhľadom na ich vplyv na dĺžku behu simulácie reprezentovanú počtom ubehnutých časových jednotiek. Pri zmenách jedného parametru zvyšné parametre ostávajú na pevnej hodnote. Pre zjednodušenie budú tieto parametre vždy nastavené na stred rozsahu nastaviteľných hodnôt. Tieto hodnoty sú nasledovné: **INITIAL-PEOPLE** = 200, **INFECTION-CHANCE** = 55, **MAX-AGE** = **INITIAL-PEOPLE** / 2, **RECOVERY-CHANCE** = 55, **BIRTH-DEATH-RATE** = 3, **AVERAGE-RECOVERY-TIME** = **MAX-AGE** / 2. Na dosiahnutie vyššej presnosti určíme výsledok ako aritmetický priemer **piatich** spustení simulácie. Dĺžku behu simulácie nazývame **T**.

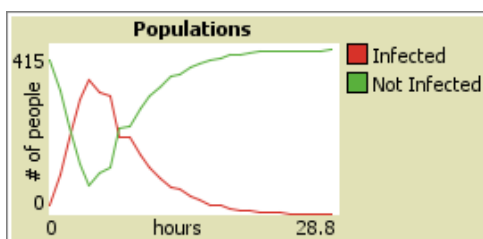
INITIAL-PEOPLE

INITIAL-PEOPLE	1.beh	2.beh	3.beh	4.beh	5.beh	Priemer
50	3	5	11	7	20	9,2
100	24	25	29	18	12	21,6
200	46	22	25	44	29	33,2
400	25	20	31	28	21	25

Zvyšovanie hustoty populácie sa do istého momentu podpisuje na raste **T**, no po prekročení určitej limity naopak **T** klesá. Poznámka: premenná **MAX-AGE** ostávala po celý čas na hodnote 30 a **AVERAGE-RECOVERY-TIME** na hodnote 15.



INITIAL-PEOPLE = 50



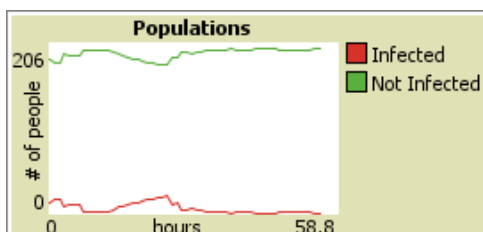
INITIAL-PEOPLE = 400

Pri vysokej hustote obyvateľstva sa epidémia šíri rýchlo, krátko po začiatku simulácie počet nakazených prevýši počet neinfikovaných. Nakazenie veľkého počtu jedincov v krátky časový úsek nám spôsobí taktiež ich hromadné uzdravenie v jeden časový moment. Epidémia sa tak nebude mať na koho prenášať, čo spôsobí jej zánik.

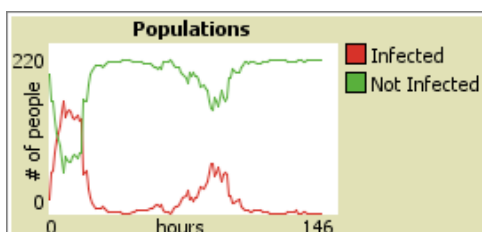
INFECTION-CHANCE

INFECTION-CHANCE	1.beh	2.beh	3.beh	4.beh	5.beh	Priemer
10	34	26	64	11	46	36,2
40	45	40	25	36	31	35,4
70	32	74	133	40	30	61,8
100	321	59	258	227	262	225,4

Nárast pravdepodobnosti nakazenia sa odráža na zvyšovaní **T**, no môžeme pozorovať nelinearitu. Najvýraznejšiu zmenu vidíme až pri nastavení INFECTION-CHANCE na 100.



INFECTION-CHANCE = 10



INFECTION-CHANCE = 100

Pri vysokom INFECTION-CHANCE sú oscilácie na grafe výrazné, čo podobne ako pri vysokom INITIAL-PEOPLE môže viesť ku „vyhladoveniu“ epidémie a jej následnému zániku. Pri INFECTION-CHANCE nastavenej na hodnotu 100% ale vzhľadom na istotu nakazenia pri kontakte dvoch jedincov epidémií stačí trvalý prísun nových obetí zabezpečených pôrodmi k tomu, aby pretrvala po dlhý čas.

MAX-AGE

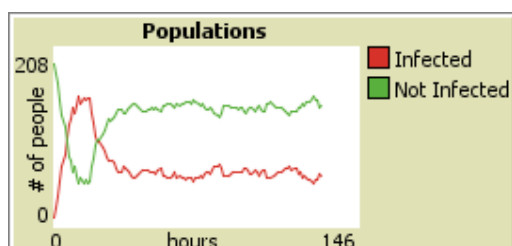
MAX-AGE	1.beh	2.beh	3.beh	4.beh	5.beh	Priemer
25	25	40	24	40	38	33,4
50	32	32	24	26	30	28,8
100	25	30	30	43	30	31,6
200	30	29	41	28	23	30,2

So zvyšujúcim sa MAX-AGE nebadat' rozdiely v **T**. Poznámka: premenná AVERAGE-RECOVERY-TIME ostávala po celý čas na hodnote 13.

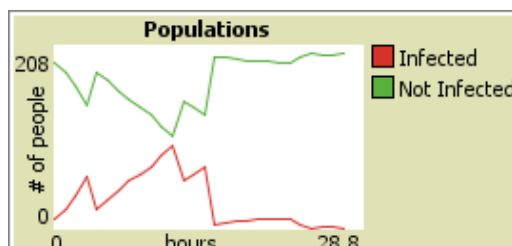
RECOVERY-CHANCE

RECOVERY-CHANCE	1.beh	2.beh	3.beh	4.beh	5.beh	Priemer
10	> 500	> 500	> 500	> 500	> 500	> 500
40	69	> 500	45	37	401	> 210,4
70	23	32	29	46	45	35
100	25	14	19	20	30	21,6

Môžeme pozorovať veľmi výrazný vplyv RECOVERY-CHANCE na **T**. Pri znižovaní pravdepodobnosti uzdravenia dĺžka **T** rapídne rastie, pri hodnote 10% dokonca šírenie epidémie nezastaví v dohľadnom čase.



RECOVERY-CHANCE = 10



RECOVERY-CHANCE = 100

Pri nízkej šanci uzdravenia pozorujeme na grafe len malé oscilácie, epidémia má malú šancu skončiť v dohľadnej dobe. Pri vysokej RECOVERY-CHANCE sú oscilácie veľmi výrazné, čo zvyšuje pravdepodobnosť skorého zániku epidémie.

BIRTH-DEATH-RATE

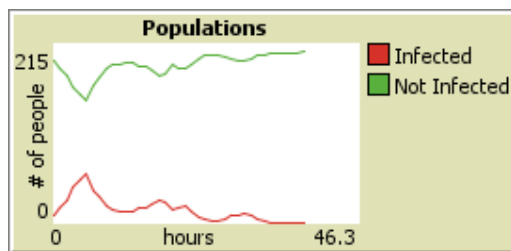
BIRTH-DEATH-RATE	1.beh	2.beh	3.beh	4.beh	5.beh	Priemer
1	27	50	32	50	25	36,8
3	26	307	40	24	41	87,6
5	> 500	252	230	195	185	> 272,4

Zvyšovanie premennej BIRTH-DEATH-RATE nám zabezpečuje vyšší prísun jedincov bez imunity, čo sa odráža na náraste **T**.

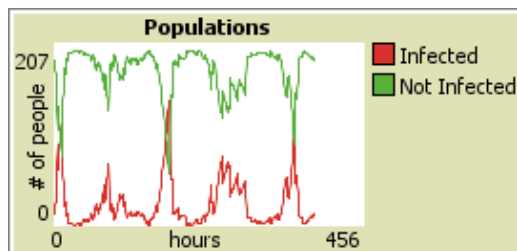
AVERAGE-RECOVERY-TIME

AVERAGE-RECOVERY-TIME	1.beh	2.beh	3.beh	4.beh	5.beh	Priemer
10	26	32	46	21	36	32,2
40	52	223	247	29	170	144,2
70	104	33	116	> 500	59	> 162,4
100	170	50	72	> 500	144	> 187,2

Nárast AVERAGE-RECOVERY-TIME spôsobuje zvyšovanie **T**. Aj pri hodnote 100 sa ale môžu objaviť behy, kde simulácia dobehne rýchlo, inými slovami, môžeme pozorovať vysokú odchýlku medzi jednotlivými **T**.



AVERAGE-RECOVERY-TIME = 10



AVERAGE-RECOVERY-TIME = 100

Pri vysokom AVERAGE-RECOVERY-TIME sú oscilácie na grafe výrazné, no napriek tomu málo ktoré z nich sú schopné epidémiu zastaviť. Vysvetľuje to vysokú odchýlku medzi jednotlivými T , dostatočne silná oscilácia sa môže ale nemusí objaviť.

ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Zistili sme, že najvýraznejšie sa na dĺžke pôsobenia epidémie podpisuje pravdepodobnosť uzdravenia jedinca. Skrátenie doby potrebnej na uzdravenie taktiež výrazne prispieva k zníženiu pravdepodobnosti šírenia epidémie. Ďalej je vhodné obmedziť pravdepodobnosť nakazenia na hodnotu menšiu ako sto percent, resp. pod inú potrebnú hranicu, aby nedochádzalo k trvalému infikovaniu nových a nových obetí.

Pri nízkej hustote populácie je len malá pravdepodobnosť vzniku epidémie, pretože nedochádza ku kontaktom medzi jedincami, naopak pri veľmi vysokej hustote obyvateľstva sa epidémia dostaví, ale má krátky priebeh. Pre šírenie epidémie je taktiež rozhodujúca priemerná dĺžka života jedinca. Populácia, ktorá sa v krátkych časových intervaloch obnovuje, predstavuje ideálne prostredie pre dlhodobé pôsobenie epidémie.

Model by bolo vhodné rozšíriť o reálnejšie dáta z oboru epidemiológie pre proces uzdravovania jedincov. V modeli epiDem jedinci, ktorým ubehla doba na uzdravenie, no v dôsledku iba určitej pravdepodobnosti byť uzdravení v danom kroku uzdravení neboli, sú opätovne uzdravovaní hneď v nasledujúcom kroku simulácie. Ako vieme, pravdepodobnosť uzdravenia je pre priebeh simulácie kľúčová, preto by bolo vhodné považovať o možnosti nastavovať interval uzdravovania ako parameter.