

## **Simulační studie k projektu IMS**

Téma č. 1: Epidemiologické modely pomocí celulárních automatů

**Lukáš Wagner, Radek Veverka**

Fakulta informačních technologií  
VUT v Brně  
prosinec 2020

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Fakta</b>	<b>2</b>
2.1	Dynamika šíření virových částic . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Koncepty modelu a simulátoru</b>	<b>3</b>
3.1	Lokace . . . . .	3
3.2	Diskretizace prostoru pro celulární automat . . . . .	4
3.3	Diskretizace času pro celulární automat . . . . .	5
3.4	Definice stavů a okolí pro celulární automat . . . . .	5
3.4.1	Simulace příchodu (generování zákazníků) . . . . .	5
3.4.2	Simulace pohybu osob . . . . .	5
3.4.3	Simulace šíření nákazy . . . . .	6
3.5	Implementace simulátoru . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Experimenty</b>	<b>6</b>
4.1	Simulace a jejich vstupy . . . . .	6
4.2	Výsledky simulací . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>8</b>
	<b>Odkazy</b>	<b>10</b>

# 1 Úvod

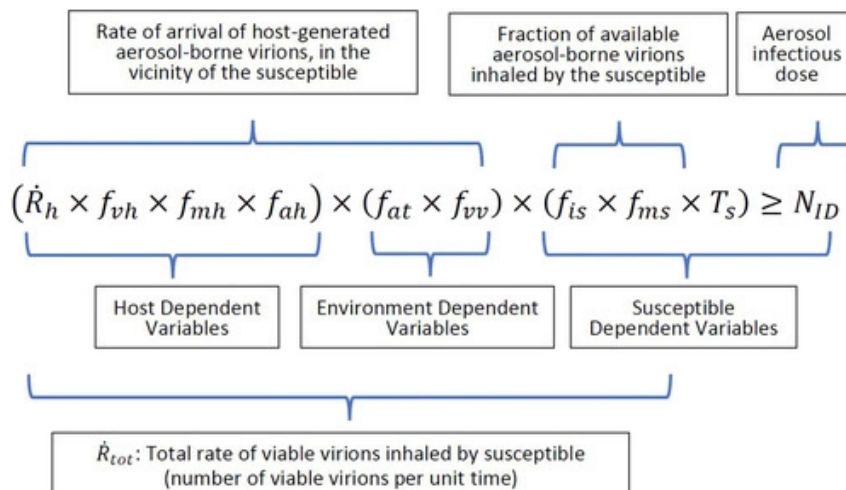
Tato studie se zabývá zkoumáním a simulací šíření viru *SARS-CoV-2*, který způsobuje onemocnění *COVID-19*. Zkoumanou lokací je supermarket o rozloze přibližně  $600m^2$ , který denně navštíví stovky zákazníků. Cílem studie je zjistit, jaký vliv budou mít určitá pravidla a omezení aplikovaná na pohyb zákazníků mezi regály v obchodě. Má smysl postavit zábrany mezi regály tak, aby všichni museli projít obchod připravenou cestou namísto nahodilého procházení mezi regály? Má smysl také nařídit minimální odstupy mezi osobami? Bude po těchto změnách z obchodu vycházet méně čerstvě infikovaných než za standardních podmínek? Studie se pokusí tyto otázky objasnit pomocí modelu založeném na principu celulárních automatů.

## 2 Fakta

### 2.1 Dynamika šíření virových částic

Přenos virových částic vzduchem se skládá z hlavních tří fází: Vydechnutí kapánek, Přenos, Vdechnutí [1]. Každá tato fáze je ovlivněna několika proměnnými. Celý přenos je popsán nerovnicí přenosu nákazy vzduchem 1. Jedná se o upravenou Drakeovu rovnici. Tato upravená

Obrázek 1: Nerovnice přenosu nákazy vzduchem, převzato z [1]

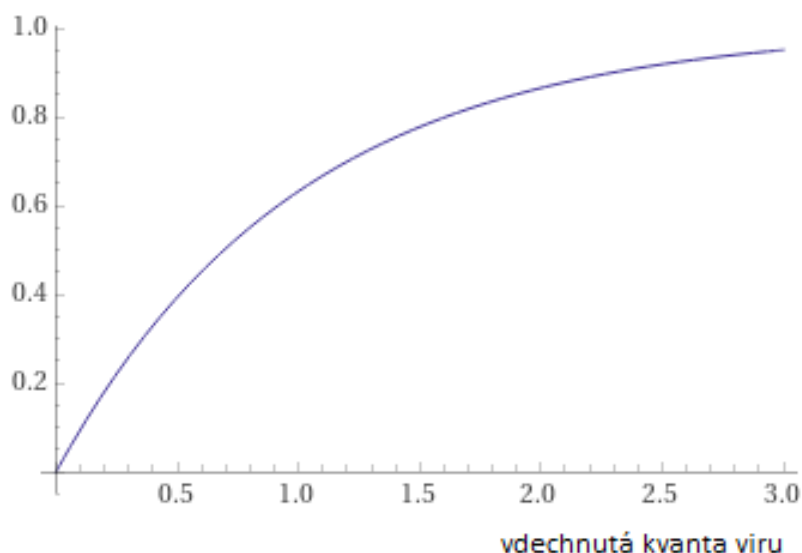


verze předpokládá existenci prahu nákazy představující počet vdechnutých částic, po němž se již člověk nakazí. Zbytek nerovnice popisuje, kolik částic se dostane od nakaženého člověka ke vdechujícímu člověku.

Pro výpočet tohoto množství je důležité znát počet částic na objem vzduchu vydechnovaných nakaženým člověkem za jednotku času a stejně tak objem vzduchu za jednotku času vdechnutý ohroženým člověkem. Mezi těmito dvěma stavy se virus šíří, usazuje a ukončuje

aktivitu. Šíření viru je velmi proměnná veličina závislá na proudění vzduchu. Virus opadá s rychlostí usazování mikrometrických částic z výšky zdroje, člověka. Ukončení aktivity viru je odvozené od jeho poloviční doby života, což je v případě SARS-CoV-2 1.1h [2]. Další důležitou proměnou je poměr výměny vzduchu ventilačním systémem. V případě mechanicky ventilovaného obchodu je tento poměr  $1.1 \text{ h}^{-1}$  [2]. Člověk nemocný Covidem-19 vydechuje přibližně  $142 \text{ quanta h}^{-1}$ , za předpokladu lehkého cvičení jako pohybu a tichého či žádného mluvení [2]. Jedno quantum je množství virových částic schopných z 63% nakazit průměrného člověka [2]. Přesněji řečeno, quantum je definováno tak, že pravděpodobnost nákazy člověka se řídí podle exponenciálního pravděpodobnostního rozložení s parametrem  $\lambda = 1$  [3]

Obrázek 2: Distribuční funkce pravděpodobnosti nakažení osoby v závislosti na vdechnutých kvantech viru, v intervalu  $< 0, 3 >$ . Vygenerováno nástrojem <https://wolframalpha.com>

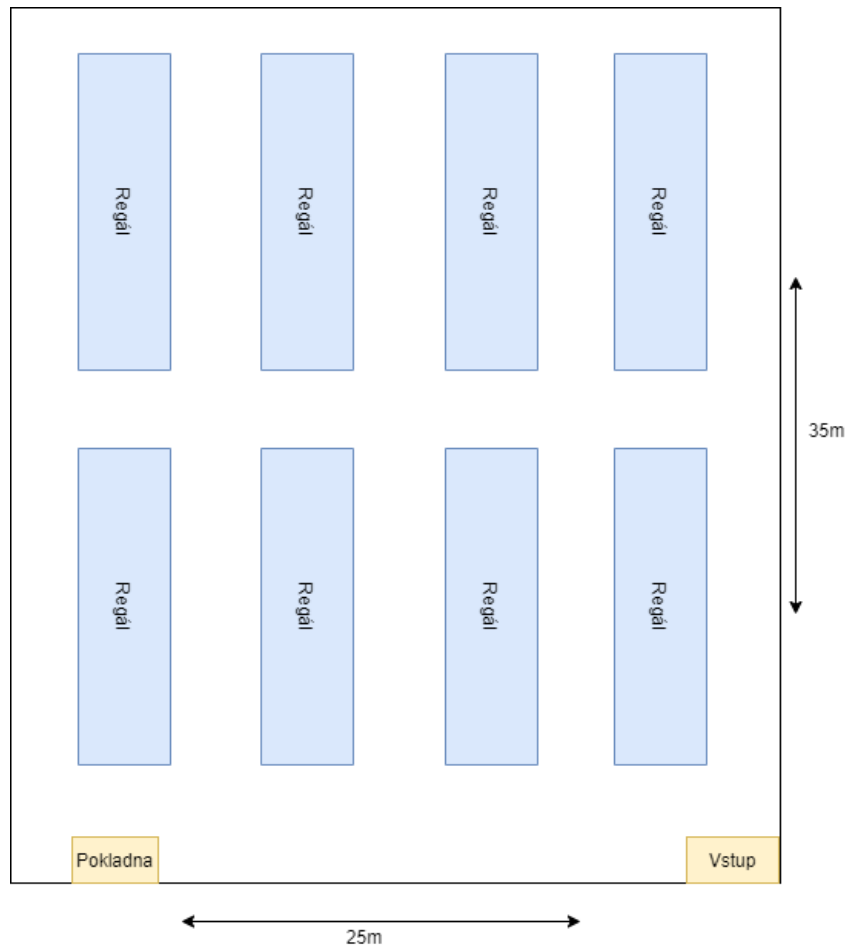


### 3 Koncepty modelu a simulátoru

#### 3.1 Lokace

Místem, které má být modelováno je supermarket, zvolili jsme proto konkrétní supermarket, který známe - Tesco v Tišnově. Nákupní hala obdélníkového tvaru má rozměry zhruba  $25 \times 35 \text{ m}^2$ , Regály jsou v prostoru rozmístěny téměř pravidelně, jak lze vidět na schématu 3. Vstup do obchodu a výstup z obchodu jsou vzájemně odděleny.

Obrázek 3: Schéma rozložení regálů v Tesco Tišnov



### 3.2 Diskretizace prostoru pro celulární automat

Celulární automat pracuje v poli  $n$ -rozměrného prostoru. Protože se zákazníci pohybují po zemi, což znamená že jejich vzdálenost od povrchu je konstantní, nemá příliš velký smysl simulovat jejich pohyb v trojrozměrném prostoru. Proto stav všech buněk automatu udržujeme v dvourozměrném poli.

Základní otázkou při modelování celulárního automatu je, jak velká bude jedna buňka, tedy jak velký prostor z reálného světa pokrývá. Při modelování relativně malého prostoru, jako je supermarket, je třeba vybrat velikost buňky dostatečně malou tak, aby se do celého prostoru vlezlo několik alespoň desítek buněk - simulace na 5 buňkách by nebyla přesná. Jako hodnotu pro velikost buňky jsme zvolili  $0.5m$  reálného prostoru. Taková velikost zajistí, že v 1 buňce se bude moci nacházet pouze jeden člověk v jednom čase.

### 3.3 Diskretizace času pro celulární automat

Simulace celulárním automatem je diskrétní, takže nepracuje souvisle v čase, ale je obnovována v pravidelných intervalech. Tento časový interval jsme zvolili  $1/3$  s, což znamená, že 1 sekunda reálného času je reprezentována 3 iteracemi simulátoru. Díky této hodnotě je možné simulovat chůzi člověka mezi buňkami, aniž by byly některé buňky simulátorem přeskočeny.

### 3.4 Definice stavů a okolí pro celulární automat

Každý celulární automat má nějakou množinu stavů, ve kterých se můžou nacházet jednotlivé buňky, a tzv. *okolí*, což jsou buňky, ze kterých jsou čerpána data pro přiřazení nového stavu konkrétní buňce. Stav buňky se v našem modelu skládá z:

- Osoby - zdali v buňce existuje a jaké má vlastnosti.
- Virových částic ve vzduchu.

#### 3.4.1 Simulace příchodu (generování zákazníků)

Příchod lidí do obchodu je náhodně generován v závislosti na čase. Např. v odpoledních hodinách nakupuje více lidí než v poledních. Míra příchodu lidí se řídí následovně:

hodina	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
příchody/min	4	4	3	2	1	1	1	2	2	4	5	3	3	2	1

Při příchodu je každému zákazníkovi vygenerován stav popisující předchozí styk s nemocí. Stav, jejich popis a poměr mezi zákazníky ukazuje následující tabulka:

stav	popis	četnost
Standardní	osoba není a nikdy nebyla nakažena	70%
Nakažlivý	osoba je aktuálně nakažena a aktivně šíří nákazu	15%
Imunní	osoba již prodělala nákazu, nešíří ji a nemůže ji chytit	15%

#### 3.4.2 Simulace pohybu osob

Základní celulární automat při výpočtu nového stavu pro buňku využívá pouze stav buňky a buňek v okolí. Při simulování pohybu zákazníků po mřížce ale v takovém případě není jak rozhodnout, kam dál se zákazník vydá - jeho pohyb by byl nahodilý. Zákazník obvykle přijde do obchodu a zamíří k jednotlivým regálům, kde nějakou dobu stojí a vybírá zboží. Nakonec se vydá vždy na stejné místo - k pokladně. Je zřejmé, že taková simulace bude vyžadovat plánování a vyhledávání cesty. Náš simulátor simuluje pohyb osob následujícím způsobem:

1. Vygeneruje se - objeví se v buňce, která značí vstup do obchodu.

2. Naplánují se zastávky u regálů. Nahodile se vyberou buňky před regály se zbožím, kde se osoba zastaví a náhodně se vygeneruje čas zastavení.
3. Algoritmem pro vyhledání nejkratší cesty se nalezne buňka další zastávky.
4. Zákazník se s každou iterací posouvá buňkami blíže k zastávce.
5. Zákazník se zastaví na zastávce na předem vygenerovanou dobu.
6. Zastávka se vyjme z plánu, algoritmus se opakuje od bodu 3., dokud existují zastávky v plánu.
7. Zákazník zamíří k pokladně, kde zmizí.

### 3.4.3 Simulace šíření nákazy

Tato část simulace už opravdu využívá okolí buňky, které je nastaveno jako *Mooreho okolí*. To znamená, že součástí okolí je 8 buňek, se kterými buňka sousedí. [4] Každá buňka obsahuje parametr *fumes*, což je kvantum virových částic aktuálně v buňce. Tato hodnota roste, pokud buňka obsahuje nakaženého zákazníka, který dýchá. Zároveň se část šíří do okolních buněk. Díky rozptýlení ve vzduchu a gravitaci však tato hodnota klesá s časem.

## 3.5 Implementace simulátoru

Simulátor je implementován v jazyce C++ a je přeložitelný příkazem `make` na Linuxu. Každá simulace je parametrizovatelná a definovaná souborem, který obsahuje:

- Seznam parametrů pro simulaci, např. doba simulace, rozložení pravděpodobnosti pro generování osob a další konstanty.
- Definice mapy a její velikosti.

Pomocí argumentů programu lze konfigurovat cestu k souboru s definicí simulace, interval vypisování aktuálních statistik během simulace a interval vykreslování buněk celulárního automatu. Spuštěním bez argumentů lze zobrazit nápovědu, jak použít argumenty.

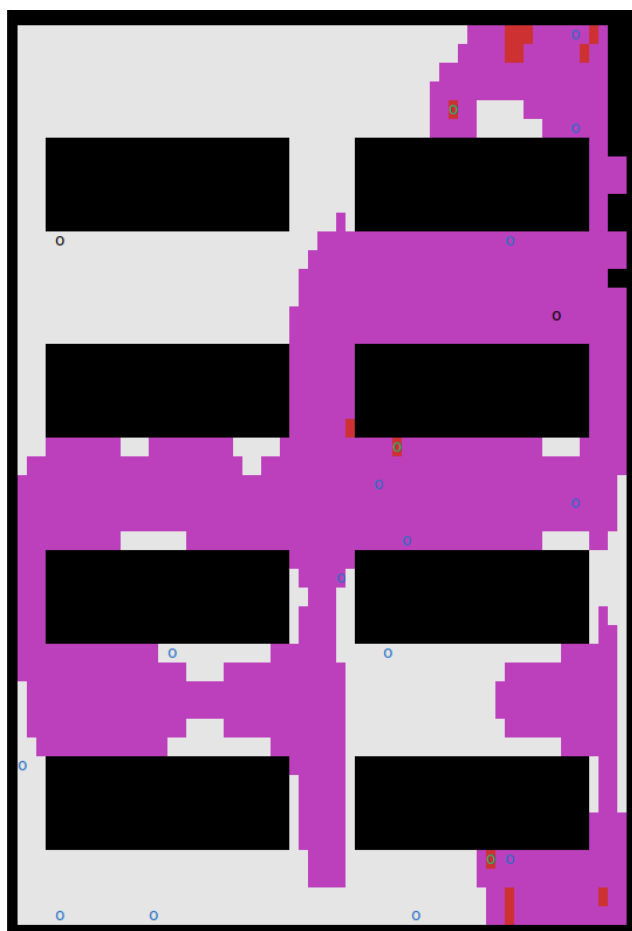
Algoritmy v simulátoru nejsou optimalizovány a vstupní data robustně ošetřována, protože toto nejsou prioritní aspekty pro studii.

## 4 Experimenty

### 4.1 Simulace a jejich vstupy

Základem této simulační studie jsou dvě simulace, které běží nezávisle na sobě. Obě simulace pokrývají 15 hodin reálného času, což zhruba odpovídá otevírací době supermarketů. Prostředí simulací se však liší. V první simulaci je obchod uspořádán běžným způsobem a nejsou stanovena žádná opatření pro udržování minimální vzdálenosti mezi osobami. V

Obrázek 4: Ukázka grafického vykreslení průběžného stavu celulárního automatu do terminálu. Černě jsou zdi a regály, bíle průchozí buňky, kružnicemi osoby. Fialovo-červené spektrum značí množství kvant viru v buňce.



druhé simulaci je pohyb po obchodě výrazně omezen, jak znázorňuje obrázek 5. Navíc je vynucen směr průchodu zákazníků obchodem a minimální vzdálenost, kterou musí udržovat. Ta je nastavena na 3 metry, což implikuje, že zákazníci se nemohou při průchodu obchodem předcházet (ulička není širší než 3 metry). Pokud se zákazník zastaví u regálu, musí zákazníci za ním počkat, než výběr zboží dokončí.

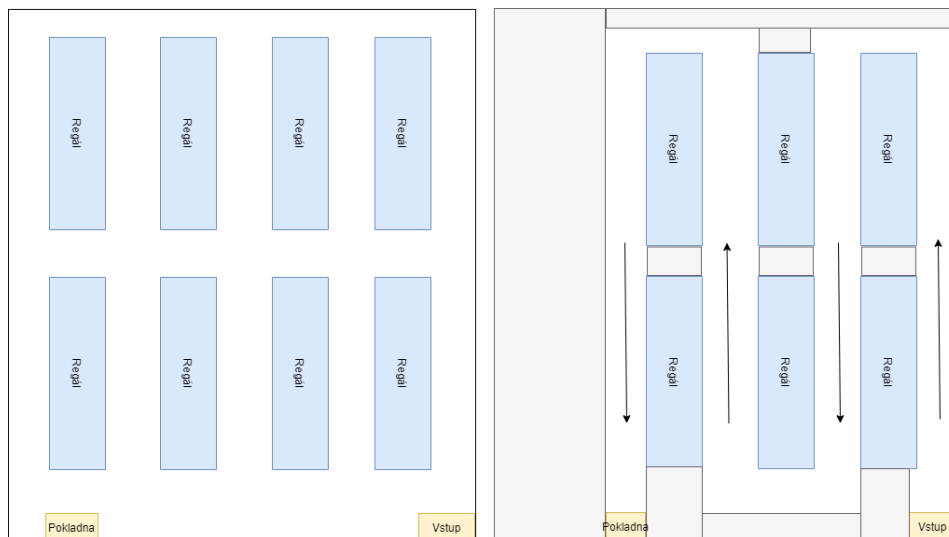
Téměř všechny vstupní konstanty a pravděpodobnostní rozložení jsou pro obě simulace stejné, bližší informace k nim lze najít v předchozích kapitolách této studie. Hlavními rozdíly na vstupu jsou organizace obchodu a délka dodržovaných rozestupů.

## 4.2 Výsledky simulací

Následující tabulka udává výsledky obou simulací:



Obrázek 5: Schéma simulovaného obchodu - vlevo pro simulaci původní, vpravo se zakázanými zónami (šedě) a příkázaným směrem nákupu.



proměnná	simulace původní	simulace organizovaná
počet zákazníků	2296	1406
počet standardních zákazníků	1607	977
počet nakažlivých zákazníků	347	220
počet imunních zákazníků	342	209
průměrná doba nákupu (minuty)	16.9	11.73
průměrně vdechnuto kvant viru	0.0401	0.01541
nově infikováno	58	15
infekční poměr	3.64%	1.566%

## 5 Závěr

Především připomeňme, že studie neřeší jak *zastavit* šíření *Convidu-19*, ale pouze *ověřuje* jednu z možností, jak zpomalit šíření nákazy. Je třeba nakazit většinu populace, aby se vybuodovala imunita, bez zásahů zpomalujících šíření by však byly přečerpány kapacity nemocnic. Druhou možností je virus kompletní izolací nechat zaniknout, toto však vyžaduje celosvětovou koordinaci a brutální zásah do ekonomiky. Studie se zaměřila na supermarkety a šíření nákazy mezi jejich zákazníky během nakupování a zkoumá případ, kdy obchod omezí pohyb zákazníků při nakupování.

Z výsledků provedených simulací je třeba nejdříve odpovědět na otázku, jaký mají zavedená opatření vliv oproti chodu obchodu za normálních okolností. V průběhu nakupování v rozmezí jednoho dne obchod opustilo 58 nově infikovaných zákazníků, zatímco po zavedení opatření pouze 15 nově infikovaných. Z toho by se dalo přinejmenším usoudit, že opatření

nejdou kontraproduktivní a opravdu zpomalují šíření nákazy. Nicméně je třeba si také uvědomit, co všechno tento pokles způsobilo a jaké to má vedlejší efekty.

Důsledkem zavedení 3 metrových rozestupů je, že do obchodu se vleze mnohem méně zákazníků najednou, konkrétně cca. 21 pro náš případ. To způsobí, že během dne obchod odbaví za normálních okolností cca. 2296 zákazníků, při rozestupech však pouze 1406, což je zhruba 1.6 krát méně. Logicky, pokud obchod navštíví méně zákazníků, tak je jich i méně nově nakaženo. Abychom mohli zkoumat, zdali mají vliv i další aspekty opatření, jako je změna průchodnosti a samotné rozestupy, je třeba vyjádřit počet nakažených poměrově. Ze všech *Standardních* zákazníků (těch, co nikdy nepřišli dříve do styku s nemocí), bylo bez opatření nakaženo 3.64% a při opatření 1.566%, což je 2,32 krát méně. Jistou roli v tomto čísle však sehraje fakt, že do obchodu přišlo méně nakažlivých lidí, pouze však zhruba 1.6 krát méně. výsledky tedy naznačují, že do sníženého počtu nově nakažených přispívají všechny faktory - menší kapacita obchodu, rozestupy a uspořádaný pohyb obchodem.

Zkoumaná opatření je nutné dát do kontextu s dalšími opatřeními, protože studie nezahrnuje některé faktory, které by příliš komplikovaly model. Níže jsou uvedeny některé body, které je třeba si uvědomit při posuzování výsledků studie.

- Nebere se v potaz usazování virových částic na zboží, pouze šíření vzduchem.
- Simulace je prováděna bez roušek.
- U pokladen se netvoří fronty. Předpokládají se samoobslužné pokladny (které v Tesco opravdu jsou) a schopnost lidí je rychle ovládat.
- Při variantě s opatřeními se tvoří fronty před obchodem.
- Obchod odbaví méně lidí. Všichni si však potřebují obstarat potraviny. Bez dalších opatření a řešení by se mohlo stát, že se lidi nahnou do malých lokálních obchodů, kde si rozšíří virus mnohem efektivněji.

## Odkazy

1. MITTAL, Rajat; MENEVEAU<sup>1</sup>, Charles; WU, Wen. *A mathematical framework for estimating risk of airborne transmission of COVID-19 with application to face mask use and social distancing*. 2020. Dostupné také z: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0025476>.
2. BUONANNO, G.; STABILEA, L.; MORAWSKA, L. *Estimation of airborne viral emission*. 2020. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020312800?via%3Dihub>.
3. MIKSZEWSK, Alex; BUONANNO, Giorgio; STABILE, Luca; PACITTO, Antonio; MORAWSKA, Lidia. *Airborne Infection Risk Calculator* [online]. 2020-07 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.unicas.it/media/4952018/AIRC%20Users%20Manual%201.0%20July%202020.pdf>.
4. PETR PERINGER. *Modelování a simulace* [online] [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/cfs.php?file=%2Fcourse%2FIMS-IT%2Flectures%2FIMS-9.pdf&cid=13998>.
5. YEZLI, Saber; OTTER, Jonathan A. *Minimum Infective Dose of the Major Human Respiratory and Enteric Viruses Transmitted Through Food and the Environment*. 2011. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12560-011-9056-7>.
6. KIRKEBY, Carsten; HALASA, Tariq; GUSSMANN, Maya; TOFT, Nils; GRÆSBØLL, Kaare. *Methods for estimating disease transmission rates*. 2017. Dostupné také z: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-09209-x>.
7. SIMLER, Kevin. *Outbreak*. 2020. Dostupné také z: <https://meltingasphalt.com/interactive/outbreak/>.
8. SITUNGKIR, Hokky. *EPIDEMIOLOGY THROUGH CELLULAR AUTOMATA*. Dostupné také z: <https://arxiv.org/ftp/nlin/papers/0403/0403035.pdf>.
9. JAMSHIDI, Babak; REZAEI, Mansour; REZAEI, Khansa. *A New Model for Epidemic Spreading with a Focus on COVID-19*. 2020. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/343066663\\_A\\_New\\_Model\\_for\\_Epidemic\\_Spreading\\_with\\_a\\_Focus\\_on\\_COVID-19](https://www.researchgate.net/publication/343066663_A_New_Model_for_Epidemic_Spreading_with_a_Focus_on_COVID-19).