

COVID-19 – fyzikálne modely, slovenské špecifiká

Štefan Luby

FÚ SAV

Bratislava, sept. 2020

1. Úvod

Pandémia COVID-19 patrí medzi globálne problémy prvého rangu. Európska komisia ju zaradila medzi kľúčové témy Európskej bezpečnostnej stratégie 2020 – 2025 [1]. Zasahuje do oblasti zdravia a sprostredkovane ekonomiky, sprevádza ju rast kriminality a podvodov spáchaných na zraniteľných skupinách osôb. Stratégia má odraz v pracovnom pláne H Europe na roky 2021 – 2022¹. COVID-19 nájdeme vo výzvach troch zo šiestich destinácií programu civilnej bezpečnosti. Ako príklad možno uviesť výzvu na mobilné laboratóriá.

Opakovane sa objavujú názory hraničiace s mysticizmom, podľa ktorých je pandémia varovaním prírody človeku [2]. Hlásia sa k tomu aj I. Anderson, výkonný riaditeľ Environmentálneho programu OSN. Uvedená aj ďalšie práce poukazujú na to, že intenzívne farmárstvo, deforestácia² a redukcia biodiverzity uľahčuje prenos vírusov medzi jednotlivými druhmi a na človeka ([3]).

Pandémia je pre vedu a aj pre slovenskú vedu príležitosťou dokumentovať svoju pohotovosť a užitočnosť. Absolutoriium patrí našim virológom, zapojili sa matematici, ekonómovia, sociológovia, historici a i., členovia UČS Slovenska i ďalší. Spoločenské javy a teda aj epidémie sa dajú interpretovať aj pomocou fyzikálnych zákonitostí. Poukážeme na to v nasledujúcom texte. Zároveň uvažujeme v čom sú príčiny dobrých výsledkov Slovenska v borbe s pandémiou.

Skrátená edícia tejto štúdie vyšla v Quarku [4]. Vzhľadom na nástup II. vlny bola aktualizovaná.

2. Fyzikálne nástroje modelovania spoločenských javov.

Fyzikálnymi metódami možno modelovať rad spoločenských javov, príklady sú uvedené v Tab. 1. Zameriame sa na niektoré z nich.

Tab. 1 Aplikácie fyziky v modelovaní spoločenských javov vrátane šírenia COVID-19

Fyzikálna teória, nástroj	Spoločenské aplikácie	COVID-19
1. termodynamika	čerpanie zdrojov – rast entropie, spoločenský odraz	matematické modely vývoja pandémie
2. fenomenologická teória difúzie	šírenie inovácií, migrácia	šírenie nákazy v čase a priestore
3. kinetická teória	bezpečnosť leteckej dopravy	lokálny prenos a teplota

¹ Na požiadanie ju môžem distribuovať.

² Zánik antického mesta Paestum sa spája s deforestáciou a zmenou v odtoku vody, čo vytvorilo podmienky pre šírenie malárie.

plynov		spoločenského prostredia
4. gravitačný model	urbanizačné procesy, dopravné toky	vplyv hustoty obyvateľstva
5. rekombinácia v polovodičoch	kombinácie znalostí, informačná adaptabilita	šírenie vírusu cez pasce
6. perkolačný model	modelovanie finančných trhov, vznik inovačných klastrov	vplyv priestorovej distribúcie subjektov

Fenomenologická teória difúzie – prvý a druhý Fickov zákon sú jednoduchým opis difúzie bez uvažovania molekulových mechanizmov. Vychádzajú z empirického poznatku, že difúzia v systéme prebieha v smere záporne vzatého gradientu koncentrácie. Príklady uplatnenia nájdeme [5, 6].

Užitočná je **kinetická teória plynov** [7]. Zdieľa sa názor, že vlastnosti veľkého množstva molekúl a správanie sa veľkých komunít majú spoločné črty [8]. Nevyhneme sa pritom zavedeniu virtuálnej „sociálnej“ teploty. Francúzsky filozof M. Halowachs sa ňou zaoberal už r. 1830.

Ďalším nástrojom je **gravitačný model** odvodený z Newtonovho gravitačného zákona. Aplikuje sa od začiatku 20. storočia v urbanizačných procesoch [9] i na charakterizovanie migrácie [10].

Určitú analógiu šírenia korona-vírusu nájdeme v **rekombinácii nosičov náboja v polovodičoch** [11].

Teóriu perkolácie ako účinný nástroj štúdia prenosu patogénov [12] na COVID-19 operatívne 19 aplikovali A. Bonasera et al. [13, 14]. Uvediem ukážku ich výsledkov.

3. Matematicé simulácie

Predikcia a modelovanie vývoja epidémií sú užitočné pri ich zvládaní. Aj sofistikované modely sú približné. Spoločenské procesy sú nedeterministické, príčiny a následky sa prelínajú, interferujú opatrenia, ktoré proces ovplyvňujú, Vzhľadom na publikované simulácie I. Podlubného netreba túto tému rozoberať. Podstatné je uvedomiť si, že tu operujeme s funkciami exponenciálneho typu, ktoré sa vyznačujú najrýchlejším rastom a to hovorí o nebezpečenstve epidémií resp. pandémieí. Ak vhodnými opatreniami zavedieme do exponentu funkcie faktor < 1 , rast spomalíme, či zastavíme. O úspechu v boji s epidémiou rozhoduje rýchlosť.

Na Slovensku sa prijali opatrenia, ktoré neboli také prísne ako v Taliansku, keď sa u nich proces už rozohrel.³ Výhodou bolo, že sme mali pred očami katastrofálny vývoj v tejto krajine aj v Španielsku a momentálne ho máme v Brazílii a v USA. Nekontrolovaný exponenciálny rast smeruje totiž do explózie [13]. Najhrozivejšie je porovnanie so štiepením uránu ^{235}U zachytením neutrónu, pričom každý akt štiepenia spravidla uvoľní dva – tri neutróny, ktoré štiepia ďalšie jadrá. Je na tom založený princíp atómovej bomby. Koeficient RO multiplikácie SARS-CoV-2 sa uvádzal v intervale 1 – 5, čo nepotrebuje ďalší komentár. Našťastie prenášači vírusu nie sú takí rýchli ako neutróny.

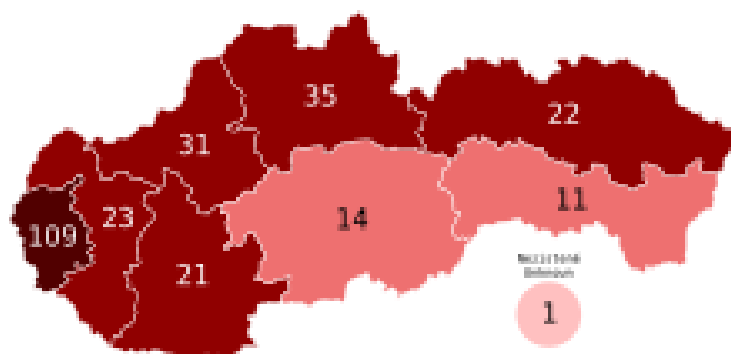
³ Priateľ zo severného Talianska mi 8. 4. 2020 napísal: „v Terste možno opustiť dom iba na nákup potravín a do lekárne.“

4. Vznik a pokračovanie nákazy

Nákaza sa šíri rýchle a obvykle ju spustí singulárna invázna akcia. Podľa [16] epidémia EVD – ebola – sa importovala z Guinei do Sierra Leone skupinou ľudí, ktorí boli v Guinei na pohrebe. Prvý zaznamenaný prípad infekcie korona-vírusom SARS-CoV – 2 v Číne bol v decembri 12. 2019, v Rakúsku 25. 2. 2020, v Česku 1. 3. 2020 a na Slovensku 5. 3. 2020. Mimoriadna situácia v SR bola vyhlásená 11. 3., núdzový stav 15. 3. Okolo polovice marca 2020 sa začal v strednej Európe regulovať cezhraničný pohyb, zaviedli sa karanténne opatrenia. Druhá polovica marca podstatne zmenila počiatkové podmienky pre šírenie vírusu i modelovanie tohto procesu. Po približne dvoch mesiacoch, teda začiatkom mája, sa situácia prechodne stabilizovala a na Slovensku sme mali iba jednociferné denné prírastky nakazených. Začiatkom júla sa na dlhodobom grafe objavil opätovný nárast, ktorý sa dal spočiatku chápať ako fluktuácia. V priebehu augusta sa začalo v zahraničí aj u nás oficiálne hovoriť o druhej vlne COVID-19. V období troch týždňov od 20. 8. do 10. 9. 2020 sa situácia v SR výrazne zhoršila, zvykli sme si na denné prírastky okolo 100, zaznamenali sme aj rekord 226. Na týchto prírastkoch mala Bratislava a jej okolie v okruhu 50 km podiel 47 %. Hlavné mesto sa dostalo do červenej zóny. Rekordné prírastky hlásili aj iné krajiny, napr. Chorvatsko, ktoré sa následkom letných dovolení stalo jedným z hlavných zdrojov rastu druhej vlny. Maďarsko zavrelo septembri 2020 svoje hranice. Slovensko zvykne udávať v rámci COVID-19 absolútne čísla. Veľké krajiny ich prepočítavajú na počet obyvateľov. Podľa prehľadu z 10. 9. 2020 má najmenší relatívny prírastok nakazených Nemecko, nasledule Poľsko a Slovensko. Druhá vlna pandémie býva intenzívnejšia ako prvá, úlohu hrá aj únava obyvateľstva.

5. Prvé štatistické údaje o šírení nákazy na Slovensku a v okolitých krajinách

Začneme údajmi z 27. 3., teda tri týždne po prvom prípade, keď bolo Slovensko rozdelené na dva pásy výskytu infekcie (Obr. 1). V priebehu apríla sa málo zasiahnutý južný pás rozpadol na mozaiku s rozličným výskytom nákazy. Rozdelenie na pásy spôsobil cezhraničný prenos z Rakúska v okolí Bratislavy a z ČR, kde bola väčšmi postihnutá Morava. Prešovský kraj mohol byť ovplyvnený Malokarpatským vojvodstvom v Poľsku. Prestup z Maďarska nebol vtedy významným faktorom. Šírenie infekcie pozdĺž severného pásu urýchl'ovala diaľnica D1 a železničná trať Bratislava-Žilina-Košice. V Tab. 2 a 3 sú údaje o ďalšom vývoji situácie na Slovensku a v okolitých krajinách.



Obr. 1 Rozdelenie identifikovaných infikovaných osôb podľa slovenských krajov 27. 3. 2020 (<https://www.dnes24.sk/>)

Tab. 2 Počty nakazených v SR podľa krajov [17, 18].

Kraj	4. 4. 2020	2. 5. 2020	Faktor rastu
Bratislava	160	355	2,2
Trnava	40	116	2,9
Trenčín	53	157	3
Žilina	59	179	3
Prešov	54	174	3,2
Nitra	31	97	3,1
Banská Bystrica	29	94	3,2
Košice	28	235	8,4
Spolu	454	1407	

Tab. 3 Počty nakazených v okolitých krajinách [19]

Krajina	4. 4. 2020	2. 5. 2020	Počet úmrtí do 2. 5. 2020
Rakúsko	11521	15457	598
ČR	4194	7676	245
Poľsko	3383	12877	644
Ukrajina	1072	10861	288
Maďarsko	678	2863	340
Rusko	4193	114431	1280
Slovinsko	934	1429	94
Slovensko	454	1407	24
Chorvátsko	1079	2076	77
Rumunsko	3183	12240	780

6. Fenomenologická teória difúzie

Dva základné typy difúzie v tuhých látkach, napr. v polovodičoch, sú

a/ difúzia z neobmedzeného zdroja prímiesi na povrchu materiálu,

b/ difúzia z obmedzeného zdroja, ktorý sa postupne vyčerpá a dopanty sa prerozdedia v objeme.

Naše modelovanie sa opiera o prvý typ, lebo vírus sa reprodukuje s faktorom RO spravidla väčším ako 1. Z 2. Fickovho zákona pre jednorozmerný prípad (vo smere x) dostaneme riešenie

$$N(x, t) = N_p \operatorname{erfc} [x / 2(Dt)^{0.5}] \quad (1)$$

kde N je koncentrácia prímiesi v mieste x a v čase t , N_p je koncentrácia na povrchu, v našom prípade v primárnom ohnisku alebo na hranici štátu, D je koeficient difúzie a erfc je komplementárna funkcia chýb. Príklady difúzných profilov sú v **Obr. 2**.

Problémom modelovania na Slovensku sú (našťastie) nízke počty nakazených, ktoré nás v prepočte *per capita* kladú stále na poprednú pozíciu v EÚ. Základná izotermálna difúzia v gradiente koncentrácie predpokladá gradient ako spojitú funkciu. Tejto požiadavke sa približuje transport osôb medzi Bratislavou a jej okolím, ktorý predstavuje **130 000** zamestnancov a študentov denne na trasách zo/do Záhoria, Pezinka, Senca, Mostu pri Bratislave, Rovinky, Rusoviec a po diaľniciach D1 a D2. Napriek obmedzeniam urobíme

odhad difúzie pre klaster okolo Bratislavy ktorý sa vytvoril behom 13 dní od 5. 3. do 18. 3., kedy regulácie neboli ešte funkčné. Vtedy sa podľa nášho predpokladu infekcia rozšírila z Bratislavy do okruhu asi 25 km a zasiahla vyššie spomenuté lokality, hlavne Pezinok a Senec. V tomto regióne bolo vtedy 53 % všetkých infikovaných osôb v SR. Potom z difúznej vzdialenosti L pre ktorú platí

$$L = 2 (Dt)^{0,5} \quad (2)$$

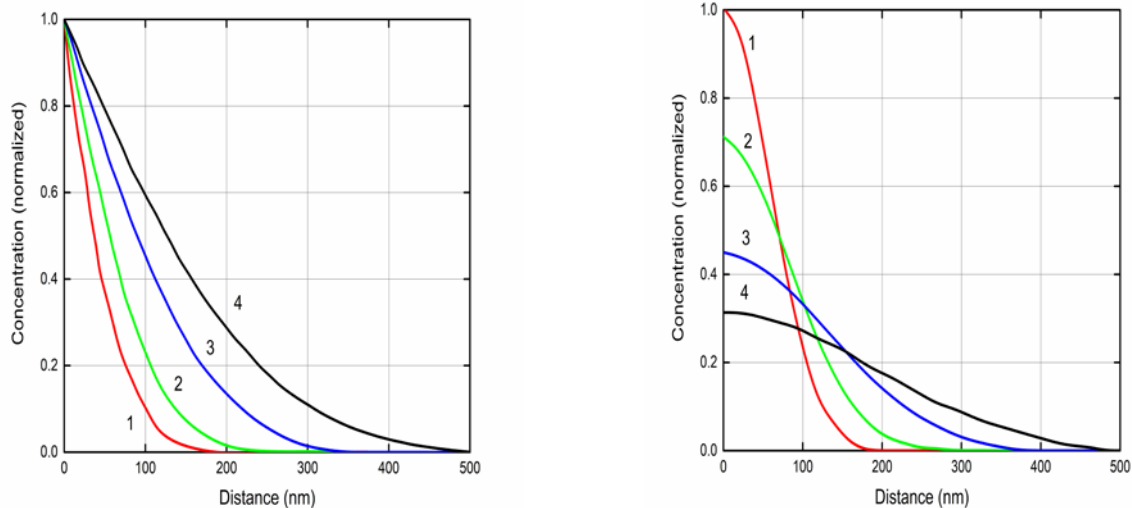
dostaneme difúzny koeficient **12 km²/deň**. (Jednotku km²/deň sme zaviedli v [6] pre difúziu migrantov. V polovodičoch sa koeficient vyjadruje v jednotkách cm²/s).

Na porovnanie v Tab. 4 sú koeficienty difúzie pre rozličné historické transfery obyvateľstva. Podobnosť koeficientu migrácie a šírenie korona-vírusu vyplýva z toho, že v oboch prípadoch sa používajú tie isté typy transportu a prekonávajú sa podobné bariéry. Aj keď hodnota 12 km²/deň je menšia ako iné koeficienty v Tab. 4, vzhľadom životné ohrozenia je stále veľmi vysoká. Keďže v priebehu marca 2020 sa prijali lokalizačné opatrenia, difúzia sa výrazne potlačila. Vhodný prípad na aplikovanie difúznej teórie by bolo šírenie nákazy z centra New Yorku do jeho metropolitnej oblasti, ktorá má vyše 20 mil. obyvateľov.

Tab. 4 Koeficienty difúzie veľkých presunov obyvateľstva [20]

Presun	Difúzny koeficient [km ² /deň]
Zlatá horúčka v Kalifornii	1370
Osídlenie Sibíri po Bajkalské jazero	142
Migrácia do Európy v r. 2013 [6]	52

Druhá vlna. Počas prvých 57 dní pandémie na Slovensku (6. 3. – 22. 4.) sme mali 1 360 infikovaných. Potom sa nárast spomalil a počas nasledujúcich 58 dní pribudlo 228 prípadov. Potom od 20. 6. do 21. 8., teda počas 62 dní, pribudlo 1 633 prípadov, čo svedčí o druhej vlne. Je to následok uvoľneného dovolenkového režimu. Vysoké počty nových prípadov v dňoch 18. – 20. 8. boli 80, 100 a 123. Z toho najviac bolo v regióne do 50 km okolo Bratislavy, ktorý zahrnul Malacky, Senec, Pezinok, Dunajskú stredú, Trnavu a i.. Tu sa zaznamenalo 66, 30 a 64 prípadov, čo je 56 % zo všetkých, resp., ako sme uviedli vyššie, v dlhšom období to bolo 47 %. Táto koncentrácia môže svedčiť o vzkriesení difúzneho transportu vírusu v regióne s veľkými internými presunmi obyvateľstva s príspevkom cezhraničných pendlerov.



Obr. 2 Difúzne profily bóru v kremíku pri teplote difúzie 1100 °C. Krivky 1 – 4 zodpovedajú trvaniu difúzie 1, 2, 5 a 10 min. Vľavo difúzia z neobmedzeného a vpravo z obmedzeného zdroja prímiesí [6].

7. Kinetická teória plynov

V priebehu apríla 2020 sa relatívne málo infikovaný južný pás Slovenska (Obr. 1) zmenil na mozaiku viac alebo menej postihnutých okresov. Príčinou bola importovaná a lokálne reprodukovaná nákaza, príkladom čoho bola situácia v osadách. Tu možno uvažovať v kontexte kinetickej teórie plynov, keď hľadáme analógiu medzi pohybom molekúl ideálneho plynu a ľudí. Základný vzťah teórie

$$\langle mv^2/2 \rangle = 3kT/2 \quad (3)$$

dáva do súvisu strednú kinetickú energiu translačného pohybu molekúl plynu $\langle mv^2/2 \rangle$ s jeho teplotou T . (Je to termodynamická teplota v Kelvinovej stupnici.) Hmotnosť molekuly je m , v je rýchlosť a k – Boltzmannova konštanta. Najpravdepodobnejšia rýchlosť molekúl je

$$v_p = (2kT/m)^{1/2}. \quad (4)$$

Predstavujeme si, že vírus sa zdieľa pohybom a stretnutiami – vo vyjadrení molekulárnej teórie zrážkami – osôb. Teplotu plynu môžeme personifikovať s “teplotou” spoločenského prostredia. Do úvahy prichádza viacero zdrojov a podôb tejto teploty.

- Je to teplota charakterizujúca mechanický pohyb a jeho rýchlosť a odvodenú frekvenciu “zrážok”. Rastie počas víkendov a sviatkov, pri udalostiach typu svadieb, pohrebov, pri poradoch a p. (Parkoviská v Bratislave pod Červeným mostom pri vstupe do areálu Železnej studničky boli aj v čase vrcholenia prvej vlny preplnené.)
- Iný typ teploty vyjadruje temperament konkrétneho etnika. (Teplejšia klíma = emocionálnejší ľudia je predpoklad, ktorý vyslovil r. 1748 Montesquieu [21]). Súvisia s tým väčšie problémy v južnej Európe.
- Tretí typ teploty súvisí s ekonomickou silou krajiny a obchodnými aktivitami. Na Slovensku je táto teplota pravdepodobne stále menšia ako v bohatých západných krajinách.

Kinetická teória plynov nás nabáda znižovať spoločenskú teplotu a miernejší priebeh nákazy na Slovensku môže korešpondovať kľudnejšiemu temperamentu, ale aj obávám, či by zdravotníctvo zvládlo pandémiu veľkého rozsahu. Lokalizácia má svoj význam, znižuje však kvalitu života a vyvoláva iné typy zdravotných problémov. Ignorovanie lokalizačného režimu otvorí však dvere difúznemu šíreniu nákazy na väčšie vzdialenosti.

8. Inšpirácia gravitačným modelom

Gravitačný model je analógiou Newtonovho gravitačného zákona $F = \kappa Mm/r^2$, kde M a m sú hmotnosti a F je sila medzi nimi, r je ich vzdialenosť a κ gravitačná konštanta.

V spoločenských systémoch sa vzťah adaptuje na geografické či demografické účely a zapisuje sa v logaritmickej forme, napr. [22]

$$\log D = a \log P_1 + b \log P_2 - c \log r + d \log X, \quad (8)$$

kde D je demografická sila, ktorá meria sociálnu interakciu, napr. migračný tok, P_1, P_2 sú početnosti populácie v interagujúcich centrách, veličina X vyjadruje ďalšiu premennú, ako HDP, zamestnanosť a a, b, c, d sú fitovacie konštanty, pričom $c \geq 0$. Gravitačný model zavádza do štúdia procesov vzdialenosť medzi interagujúcimi subjektmi.. V ďalšom sa pokúsime odhadnúť jej vplyv, ktorý je v šírení nákazy určujúci a prejavuje sa v stanoveniach bezpečnej vzdialenosti, izolovaní nakazených, potenciálnych šíriteľov či eliminovaní prenosových „pascí“ (kap. 9).

V našom prípade model použijeme na porovnanie výskyt nákazy v Bratislave a v okolitých metropolách resp. veľkých aglomerácií Viedeň, Praha, New York (Tab. 5). Predpokladáme, že potenciál nákazy je úmerný početnosti populácie P . Pomer N/P kde N je počet nakazených je v poslednom stĺpci Tab.5. (Správnejšie by bolo použiť počet nakazitelných – susceptible, ten však býva dnes už iba zlomkom početnosti populácie a nedosahuje také hrozivé hodnoty ako v dávnej minulosti.) Ďalej predpokladáme, že potenciál je nepriamo úmerný strednej vzdialenosti L medzi občanmi, avšak v tomto prípade mocninovo, s exponentom α . Uvažujme rozdelenie občanov v uzloch štvorcovej siete. Potom $L = 1/(\sigma)^{0.5}$, kde σ je plošná hustota obyvateľstva v meste. V ďalšom ju vyjadríme ako bezrozmernú veličinu L_1 normalizovanú na dĺžku 1 m, pretože bezpečná vzdialenosť sa spravidla stanovuje ako 2 m. N potom vyjadríme vzťahom

$$\log N = K + \log P - \alpha \log L_1 \quad (9)$$

kde K je konštanta úmernosti.

Tab. 5 Infikovanie občanov vybraných miest a súvisiace demo- a geografické veličiny, 5. -6. 5. 2020. (Údaje v stĺpcoch 2, 3, 5 pochádzajú z internetových stránok miest a národných máp šírenia pandémie COVID-19, napr. [23].)

Mesto	P (2019)	σ [km ⁻²]	L_1	N 5. -6. 5. 2020	N/P
Bratislava	437 725	1 190,5	29,0	206	$4,4 \cdot 10^{-4}$
Viedeň	1 897 776	4326	15,2	2204	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Praha	1 294 513	2582	19,7	1782	$1,4 \cdot 10^{-3}$
New York City	8 399 000	10 715	9,7	181 034	$2,1 \cdot 10^{-2}$

Model aplikujeme na niekoľko kombinácií miest Bratislava, New York, Praha a Viedeň. Do (9) dosadíme pre zvolenú dvojicu jej údaje, čím dostaneme dve rovnice o dvoch neznámych K

a α . Výsledky sú v **Tab. 6**. Z hodnôt α vidieť, že vplyv hustoty osídlenia je značný a bezpečné vzdialenosti treba rešpektovať.

Tab. 6 Exponent α a konštanta K pre kombinácie miest z Tab. 5

Kombinácia	Exponent α	Konštanta K
Bratislava – Viedeň	1,39	-1,29
Batislava - Praha	2,76	0,70
Bratislava – New York	3,55	1,85
Viedeň – New York	6,74	5,11
Praha – New York	4,00	2,30

9. Podobnosť s rekombináciou nosičov náboja v polovodičoch

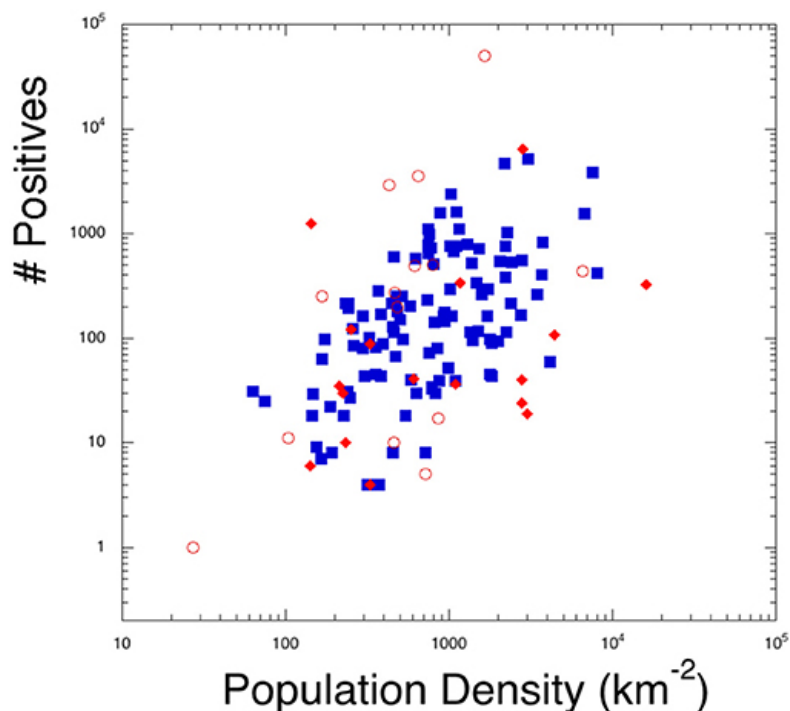
Pre funkciu polovodičových súčiastok je významná generácia párov elektrón-diera absorpciou fotónov. Elektróny a diery sa po čase spoja – rekombinujú. V polovodiči ako GaAs s tzv. priamou pásovou štruktúrou prebieha radiačná bimolekulárna rekombinácia. Dochádza pritom k emisii žiarenia – napr. v LED svietidlách. V najviac používanom polovodiči – v kremíku s nepriamou pásovou štruktúrou prebieha neradiačná rekombinácia s uvoľnením fotónu aj fonónu – tepelného kvanta. Túto sprostredkujú pasce v polovodiči. Je to tzv. Shockley-Read-Hallov mechanizmus. Pasce sa vytvoria dotovaním alebo sú to defekty kryštálovej mriežky. Pasca absorbuje diferenciu impulzu medzi rekombinujúcimi nosičmi náboja v kremíku.

Táto pre laika málo zaujímavá pasáž poukazuje na to, že nestačí, aby sme vylúčili bimolekulárne interakcie, teda aby sa ľudia v dopravných prostriedkoch alebo supermarketoch nedotýkali. Treba sa vyhnúť prenosu vírusu prostredníctvom pasce – predmetu z kovu, plastu alebo iného materiálu, na ktorom vírus ulpje na dobu niekoľko hodín až dní. Sú nimi aj obaly tovaru. Takto zabalené predmety mohli vziať do ruky zákazníci, ktorí ich nekúpili a urobili z nich infikované “pasce” v skutočnom zmysle slova.

Prenosom bimolekulárneho typu sa bránime rúškami, respirátormi, vzdialenosťou. Prenosu cez pasce sa bránime rukavicami, najlepšie jednorázovými, ktoré dostaneme priamo v obchode. Nezaškodí obaly doma dezinfikovať alebo zlikvidovať.

10. Perkolačné modely pandémie COVID-19

Témou perkolácie sa budem zaoberať v inej publikácii. Tu uvediem ilustratívny výsledok práce [13] ktorý korešponduje výpočtom v odseku 8. Zovšeobecnený poznatok z teórie perkolácie aplikovanej na prenos vírusu uvádza kritickú hustotu obyvateľstva okolo 1000/km². Za tejto podmienky implantovaný nukleus energicky rastie a rozširuje sa do okolia. Dokumentuje to **obr. 3**. Na základe toho sa odporúča dočasné sťahovanie obyvateľstva do menej zaľudnených oblastí.



Obr. 3 Počet pozitívnych prípadov (20. 3. 2020) ako funkcia hustoty obyvateľstva v talianskych provinciách (plné štvorciky), v regiónoch Republiky Kórea (kosoštvorce) a v niektorých regiónoch Číny (prázdné krúžky). Kredit A. Bonasera [13].

Tieto výpočty môžeme zovšeobecniť s použitím údajov o miere urbanizácie krajín EÚ [24]. Jej hodnoty, teda podiel obyvateľstva žijúceho v mestách, sa v roku 2020 pohybuje od 98,1 % v Belgicku po 53,8 % na Slovensku. Priemer EÚ 27 je 73,8 %. Podľa [25] hustota obyvateľov v slovenských mestách je v priemere 398/km² a na vidieku 61/km². Keďže hustota obyvateľstva je akceptovaným faktorom prenosu infekcií, možno nízku mieru urbanizácie v prípade COVID-19 považovať za výhodu SR. Navyše Svetová zdravotnícka organizácia (WHO) upozornila na všeobecne horšie podmienky na zdravý život v mestách [26], v súvislosti s COVID-19 treba spomenúť znečistenie ovzdušia.

11. Zdravotné a ekonomické súvislosti výsledkov SR v boji s pandémiou

Výsledky Slovenska v boji k COVID-19 sa spájali s rozhodnosťou politikov a riadiacich orgánov, ale hlavne s disciplínou a dôslednosťou ľudí. Aké motivácie treba za tým hľadať? U vlády sú to obavy zo zlyhania v manažmente epidémie i z ekonomického rozvratu. U občanov je to strach o život a o ekonomické prežitie. V našej situácii sa pozrieme na súvislosti priebehu COVID-19 so štyrmi spoločenskými súvislosťami:

1. **Stav slovenského zdravotníctva a jeho potenciál na zvládnutie pandémie.**
2. **Zadĺženie slovenských domácností.**
3. **Pokles priemyselnej výroby.**
4. **Internetizácia krajín EÚ.**

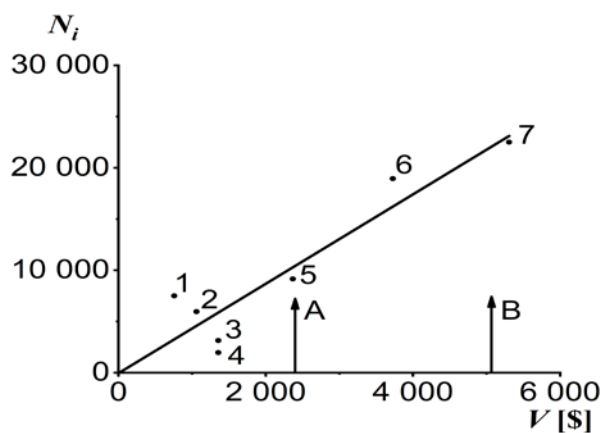
Ad 1. Naše zdravotníctvo funguje tradične v stave zadĺženosti, emigrácie lekárov, chýbajúcich liekov a p.⁴ (V súvislosti s COVID-19 oficiálna správa hovorila, že v prípade

⁴ Emigrácia lekárov a zdravotného personálu ohrozuje osobitne v období súčasnej pandémie niektoré nové členské štáty EÚ a kandidátske i ďalšie krajiny Balkánu [27]. Napr. Rumunsko stratilo medzi rokom 2009 a

väčšej krízy bude k dispozícii iba polovica z odhadnutých 1000 potrebných pľúcnych ventilácií. Dnes vidíme, že zatiaľ v prvej vlně sa používali tri-štyri kusy súčasne, v druhej vlně sa tento počet zdvojnásobuje.)

Hypotézu č. 1 overíme nasledovne. Krajiny EÚ-27 (po brexite) kvôli jednoduchosti spojíme do ôsmich trojíc a jednej dvojice podľa rovnomerne klesajúcich výdavkov V na zdravotnú starostlivosť vyjadrenú v % HDP na hlavu za rok 2019. Údaje sú v US dolároch [28]. (Luxembursko s anomálne vysokým HDP na hlavu vynecháme.) Priemerné hodnoty V porovnáme s priemerným počtom infikovaných N_i v skupinách ku dňu 6. 5. 2020. Ukazuje sa, že hodnoty siedmich skupín (s výnimkou Portugalska – Talianska – Španielska – počet nakazených 153 654 a Francúzska – Nemecka – Švédsko – počet nakazených 128 768) možno aproximovať priamkou preloženou metódou najmenších štvorcov (obr. 4)

$$N_i = 4,36 V - 36 \quad (10)$$



Obr. 4 Počet infikovaných v EÚ vs. výdavky na zdravotníctvo na občana spriemernené pre šesť trojíc krajín, body 2 – 7 a jednu dvojicu – bod 1. Slovensko je pod bodom 3 v trojici s Českom a Cyprom. Bod 7 má trojica Rakúsko-Holandsko-Dánsko. Šípky A a B označujú polohu trojíc Portugalsko et al. a Francúzsko et al.

Pre trojicu Česko-Slovensko-Cyprus dostaneme výpočtom 6020 infikovaných, realita je 3139. Naša trojica teda leží pod čiarou. Pod čiarou je aj trojica Slovinsko-Grécko-Bulharsko (bod 4), nad ňou skupina Rumunsko – Lotyšsko (bod 1). Južnú Európu ovplyvňuje Taliansko, kde sa pandémia začala, v západnej Európe mohla závažiť dôvera vo vlastnú ekonomiku. Keď si odmyslíme skupiny A, B, je zrejmé, že **počet infikovaných s rastom výdavkov na zdravotníctvo paradoxne stúpa**, čo na druhej strane svedčí o opatrnosti občanov krajín, kde je zdravotníctvo na nižšej úrovni. (Tieto výpočty bude vhodné modifikovať na relatívne počty infikovaných vo vzťahu k početnosti populácie a treba si zároveň uvedomiť, že **vyššie výdavky na zdravotníctvo neznamenajú ich dostupnosť pre každého občana.**)

Ad 2. Zadlženosť domácností v EÚ-27 v rokoch 2012 až 2018 nájdeme v [29]. Pre vzájomné porovnanie sa vyjadrujú v % HDP. Krajiny môžeme rozdeliť na skupinu, ktorej zadlženosť v uvedenom období klesla. Je to spolu 19 krajín. Zadlženosť rástla v skupine Belgicko, Česko, Francúzsko, Luxembursko, Poľsko, Slovensko, Fínsko, Švédsko.. Rast bol spravidla v rámci 10 % s výnimkou Slovenska, kde pomerový koeficient dosiahol údajne 1,49. Dá sa

2015 polovicu svojich lekárov, medzi júnom 2013 a marcom 2016 vyše 4200 odborníkov z Bosny-Hercegoviny prešlo do nemeckého zdravotníctva, a pod.

predpokladať, že aj obavy slovenských domácností z rodinného bankrotu zvyšujú opatrnosť v období krízy.

Ad 3. Súčasný pokles priemyselnej výroby vo svete sa považuje za následok šírenia epidémie. Budeme vychádzať z dvoch skupín údajov: a) medziročný percentuálny pokles priemyselnej výroby *PV* v máji 2020 voči máju 2019, b) percentuálny pokles *PV* v marci 2020 voči februáru 2020 plus pokles v apríli voči marcu 2020. Hodnoty jednotlivých krajín sú od niekoľkých percentuálnych bodov až do 50 %. Slovensko je na tom v oboch prípadoch horšie, v prvom prípade sa uvádza pokles 33,5 %, v druhom 47,2 % [30].

Vezmeme prvý prípad a *PV* porovnáme s percentuálny podielom infikovaných osôb *IO* v tej-ktorej krajine prepočítaný na početnosť populácie. Hodnoty sa pohybujú od 0,47 % pre Španielsko, po 0,026 % pre Slovensko.

Keď znázorníme jednotlivé krajiny v súradnicovom systéme *x-y*, zistíme, že v obdĺžniku $0 \leq PV \leq 20 \%$
 $0 \leq IO \leq 0,2 \%$

sa nachádzajú Bulharsko, Dánsko, Estónsko, Fínsko, Grécko Chorvátsko, Malta, Litva, Lotyšsko, Poľsko, Slovinsko. Tieto krajiny z hľadiska výpadkov priemyslu zvládajú pandémiu vcelku dobre. Sú úspešné v turizme, forsírujú zelenú ekonomiku, resp. sú to pobaltské štáty, ktoré neležia na hlavných dopravných trasách. Ak im zarátame straty v cestovnom ruchu, obraz sa zmení, ale v prípade Fínska a Dánska málo.

V obdĺžniku
 $20 \leq PV \leq 40 \%$
 $0,2 \leq IO \leq 0,5 \%$

ležia krajiny, ktoré utrpeli v pandémii veľké straty, ako Španielsko, Taliansko, Portugalsko, Nemecko a Francúzsko.

Pozrime sa ešte na pás pozdĺž osi *x*
 $0 \leq PV \leq 40 \%$
 $0 \leq IO \leq 0,04 \%$

Ležia v ňom Bulharsko, Litva, Maďarsko a Slovensko. Avšak Slovensko má z nich najväčší medziročný pokles priemyselnej výroby. Ak budeme tieto krajiny charakterizovať súčinom *IO x PV*, ktorý hovorí o úspechu jednotlivých krajín v čelení epidémie pri malom poklese priemyslu, hodnoty sú nasledujúce:

Litva $0,05 \times 6,1 = \mathbf{0,305}$, Bulharsko $0,025 \times 16,7 = \mathbf{0,417}$, Maďarsko $0,032 \times 27,6 = \mathbf{0,883}$, Slovensko $0,026 \times 33,5 = \mathbf{1,340}$. Na porovnanie Španielsko **11,750**.

Ad 4. Na zvládanie pandémie má vplyv internetizácia krajiny, ktorá je pilierom práce z domu a komunikácie on-line. Tu veľké rozdiely v dnešnej EÚ už nevidíme. Západ atakuje hranicu 100 % internetizácie domácností, v niektorých krajinách, napr., v Dánsku táto hodnota naopak klesá, asi v súvislosti s kybernetickou kriminalitou. Stredná Európa a V4 sa blížia k 90 % a Balkán k 80 %.

12. Záver

Z aplikovania jednotlivých zvolených fyzikálnych teórií a nástrojov na šírenie korona-vírusu na Slovensku, príp. aj inde, vyplynuli nasledujúce poznatky.

Difúzny mechanizmus vedie k pomerne rýchlemu šíreniu nákazy, o čom svedčí odhadnutý koeficient difúzie 12 km²/deň, aj keď je cca 4 x menší ako na porovnanie zvolený koeficient difúzie pri migrácii do Európy v tomto decéniu.

Z kinetickej teórie plynov vyplýva nutnosť znižovať virtuálnu teplotu spoločenského systému, ktorá môže súvisieť aj s národným temperamentom jednotlivých etníc.

Hlavným poznatkom vyplývajúcim z gravitačného modelu je skutočnosť, že infekčnosť prudko rastie so znižovaním strednej vzdialenosti medzi obyvateľmi v rezidenčných štvrtiach a lokalitách, a to v analyzovaných modelových prípadoch až vo štvrtej mocnine. Tieto poznatky potvrdzujú výpočty s použitím perkolačného modelu.

Analógia s rekombináciou nosičov náboja v polovodičoch poukazuje na nebezpečenstvo stacionárnych pascí, prostredníctvom ktorých sa vírus šíri aj keď sa vzdialenosťou eliminuje priamy prenos medzi osobami.

Slušné výsledky Slovenska v boji s chorobou COVID-19 sa dávajú do súvisu s opatrnosťou obyvateľstva, dva zdroje ktorej môžu byť obavy zo stavu nášho zdravotníctva a zadĺženia našich domácností. Ak však vyhodnotíme schopnosť jednotlivých krajín vzdorovať pandémie v súbehu s poklesom priemyselnej výroby, je pozícia Slovenska horšia. Potešiteľné sú informácie (V. Baláž, 28. 8. 2020), že už v júni 2020 sa ekonomika začala vracieť do normálu.

Na rozdiel od štandardného záveru iných publikácií v tomto prípade dúfam, že uvedené poznatky sa nebudú dať v budúcnosti využiť. Ospravedlňujem sa tiež našim ekonómom za pytliačenie v ich revíri.

Apendix 1

V júni 2020 uverejnila investičná firma Deep Knowledge Venture, Hong Kong, štúdiu [31], v ktorej zhodnotila pripravenosť krajín sveta čeliť pandémie COVID-19. Hodnotili sa

- vládne opatrenia,
- situácia v okolitom regióne,
- monitoring a detekcia infikovaných,
- pripravenosť pohotovostných zožiek,
- efektívnosť karantény,
- pripravenosť zdravotníctva.

Slovensko sa dostalo na 59 priečku, keď v jednotlivých kritériách obsadilo nasledujúce miesta: 24, 41, 71, 71, 77, 78.

Poradie prvej desiatky:

Švajčiarsko, Nemecko, Izrael, Singapúr, Japonsko, Rakúsko, Čína, Austrália, Nový Zéland, Južná Kórea.

Poradie v našej desiatke od 51 do 60:

Uruguay, Vatikán, Taliansko, Srbsko, Filipíny, India, Rumunsko, USA, Slovensko, Francúzsko.

Poradie ďalších krajín V4:

Maďarsko 18, Poľsko 28, ČR 43.

PodĎakovanie

Za pripomienky ďakujem P. Lobotkovi, M. Lubyovej, L. E. Rothovi, B. Peťkovi, I. Červeňovi a R. Kinderovi.

Literatúra

- [1] Oznámenie komisie Európskemu parlamentu, Európskej rade, Európskemu hospodárskemu a sociálnemu výboru a výboru regiónov o stratégii EÚ pre bezpečnú úniu, EK dokument COM(2020) 605 final, 24. 7. 2020.
- [2] J. Weckert, Is COVID-19 a message from nature? *Nanoethics* 14, 2020, 129 – 133.
- [3] R. K. Plowright et al., Ecological dynamics of emerging bat virus spillover, *Proc. R. Soc. B* 282, 2015, 20142124.
- [4] Š. Luby, Pandémia očami fyziky, *Quark* č. 8, 2020, 13 – 15.
- [5] E. Rogers, *Diffusion of innovations*, 5th edition, Simon&Schuster, New York, 2003.
- [6] Š. Luby, Present migration flows into Europe in terms of diffusion theory and gravity model, *Amer. Inst. Phys. Conf. Proc. No. 1996*, AIP Publishing 2018, 020028-1 – 9, ISBN 978-0-7354-1712-0.
- [7] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *Feynmanove prednášky z fyziky*, 2. diel, Bratislava, Alfa 1982, s. 239 – 258.
- [8] M. Patriarca, A. Chakraborti, arXiv:1305.0768v3[physics-socph], 2017.
- [9] E. H. Foubert, A. B. Murphy, H. J. de Blij, *Human Geography, People, Place and Culture*, J. Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2012.
- [10] T. Afifi, K. Warner, *The impact of environmental degradation on migration flows across countries*, WP No. 5, United Nation University, Bonn, Germany, 2008, 25 p.
- [11] I. Ruge, *Halbleiter-Technologie*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1984, S. 2018.
- [12] A. D. Washburne et al., Percolation models of pathogen spillover, *Phil. Trans. R. Soc. B* 374, 2018, 20180331.
- [13] A. Bonasera, S. Zhang, Chaos, percolation and the coronavirus spread, *Front. Phys.*, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.05.07.20094235>, posted July 8, 2020.
- [14] A. Bonasera, G. Bonasera, S. Zhang, Chaos, percolation and the coronavirus spread: The Italian case, *Eur. Phys. J. Plus*, 135, 2020, 453 – 1 – 12.
- [15] P. L. Kapica, *Experiment, teorie, praxe*, Mlada fronta, Praha 1982, 485 s.
- [16] M. Koivu-Jolma, A. Annala, Epidemic as a natural process, *Mathematical Biosciences*, 299, 2018, s. 97 – 102.
- [17] <https://www.dnes24.sk/korona-mapa-nakazy-na-slovensku/>
- [18] <https://domov.sme.sk/c/22375860/korona-virus-mapa-covid-19-slovensko-nakazy.html>
- [19] <https://www.tvnoviny.sk/koronavirus/koronavirus-vo-svete>
- [20] Š. Luby, Modelovanie migračných tokov do Európy a ich súvis s klimatickou zmenou, *Životné prostredie* 53(2), 2019, 116 – 122.
- [21] [18] <http://www.eoht.info/page/Encyclopedia+of+Human+Thermodynamics>.
- [22] M. J. Greenwood, Modeling migration, *Encyclopaedia of Social Measurement*, Elsevier Inc., 2005, Vo. 2, p. 725 – 734.
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/COVID-19_pandemic_in_Slovakia
- [24] Central Intelligence Agency – the world factbook 2020, <https://www.cia.gov/library/>
- [25] <http://statdat.statistics.sk>
- [26] <https://www.biosferaklub.info/who-varuje>.
- [27] A. Vračič, Stopping medical brain drain from the Balkans, *IWMpost*, No. 125, Spring/Summer 2020, p. 8.

[28] Healthcare expenditures across the EU: 10 % of GDP.

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/product-eurostat-news/-/DDN-20190904-1>

[29] <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tipsd22/default/table/?lang=en>

[30] Eurostat, resp. SME 17. 7. 2020

[31] The 100 safest countries in the world for COVID-19,

<https://www.forbes.com/sites/johnkoestier/2020/06/05/the-100/>