

TANULMÁNYOK / ARTICLES

A SARS-CoV-2 vírus magyarországi terjedésének ágens alapú modellezése – az első járványhullám tapasztalatai

The spread of SARS-CoV-2 virus in Hungary – agent-based modelling scenarios for the first wave of the pandemic

LENNERT JÓZSEF

LENNERT József: tudományos munkatárs, Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont, Regionális Kutatások Intézete; 6000 Kecskemét, Rákóczi út 3.; lennert.jozsef@rtk.hu; <https://orcid.org/0000-0002-2653-3791>

KULCSSZAVAK: COVID-19; koronavírus; forgatókönyv; ágens alapú modellezés; Magyarország

ABSZTRAKT: A SARS-CoV-2 vírus okozta COVID-19 pandémia az eddigi egyik legnagyobb kihívás, amivel az emberiségnek a XXI. században szembe kellett néznie. A tanulmányban bemutatott kutatás az új típusú koronavírus-fertőzés első magyarországi hullámának tér- és időbeli lefutását modellezi, remélve, hogy hozzájárul a vírus terjedésének feltérképezéséhez. A modellezéshez ágens alapú módszertant használtam, az ágensek a magyar lakónépesség tagjait testesítik meg. A program a futtatás során hat, a fertőzés átadására alkalmas társas érintkezési módot különböztet meg. A népességet koruk és gazdasági aktivitásuk alapján nyolc aktivitási csoportba osztottam; az egyes aktivitási csoportok eltérő mértékben vesznek részt a definiált társas érintkezési formákban. A fertőzésterjedés vizsgálatához tizenkét forgatókönyvet alakítottam ki, amelyek eltérhetnek aszerint, hogy mekkora a feltételezett alap reprodukciós ráta, a külföldi forrásból származó fertőzések az ország mely részén jelennek meg, hogy a modellfuttatás során életbe lépnek-e fertőzést korlátozó szabályok, és ha igen, a fertőzés kezdetétől számítva milyen késéssel.

A korlátozásokat nem tartalmazó forgatókönyvek az elvárható exponenciális görbét rajzolják ki, hat napos duplázódással. A kapott eredmények a munkahelyen történő fertőzések elsődleges szerepét mutatják a fertőzés továbbterjesztésében, ezt követi az iskolai, illetve a háztartáson belüli fertőzésátadás. A modellezés területi eredményeinek kiértékelése alapján a fertőzés elsősorban a nagy földrajzi távokat is áthidalni képes hierarchikus diffúzióval, másrészt az ingázási kapcsolatokon keresztül terjed a települések között. A bevezetett korlátozások elsősorban a hierarchikus diffúziós terjedést gátolták meg, és megnövelték a háztartáson belüli fertőzésátadás relatív jelentőségét. A kapott eredmények alapján a korlátozások elégségesnek bizonyultak az exponenciális növekedés megtörésére mind az alacsonyabb, mint a magasabb alap reprodukciós rátát tartalmazó forgatókönyvekben. A kapott eredményeket a hivatalos fertőzésszámokkal és a H-UNCOVER országosan reprezentatív felmérés tapasztalataival is összevettem.

József LENNERT: research fellow, Institute for Regional Studies, Centre for Economic and Regional Studies; Rákóczi út 3., H-6000 Kecskemét, Hungary; lennert.jozsef@rtk.hu; <https://orcid.org/0000-0002-2653-3791>



KEYWORDS: COVID-19; coronavirus; scenario; agent-based modelling; Hungary

ABSTRACT: *The COVID-19 pandemic, caused by the SARS-CoV-2 virus has been one of the greatest challenges of the 21st century. This paper aims to contribute to scientific discussions about the timeline and spatial patterns in the spread of the virus by presenting a modelling study of the first wave of the epidemic in Hungary. The self-designed program implements agent-based methodology, with agents representing the inhabitants of Hungary. Six types of social situations with risk of infection were distinguished: household contacts, education, workplace, everyday activities, leisure activities, transportation. Based on their socioeconomic characteristics, agents were clustered in eight activity groups: children under three years; kindergarteners and primary school pupils; high schoolers; university students; commuters; local employees; people between the age of 15-64 and unemployed, economically inactive or in home office; elderly. Each activity group showed different frequency of social contacts in the defined social situations. The programme also took linkages between municipalities into consideration, and in order to simulate intermunicipal flows, the gravity-model was adapted. In order to explore the different possibilities, 12 scenarios were created. The scenarios differ from each other in their base reproduction number, the initial location of the infection, the existence of restrictions, and the time-delay of the restrictions.*

The unrestricted scenarios draw out the expected exponential growth pattern with six-day duplication. The results indicate that under unrestricted circumstances, workplace contacts have the highest significance in the spread, followed by contacts during education and within households. Under unrestricted scenarios, university students and commuters are the most susceptible to infection. The spread between municipalities shows a hierarchical diffusion pattern, combined with dispersion within commuting zones. At an early stage, the virus shows a tendency for concentration, due to the significance surplus of the largest cities. The results indicate that restrictions successfully limited the hierarchical diffusion of the virus. After the full implementation of restrictions, the effective reproduction number sunk below 1 in every scenario for every activity group. However, the relative significance of infections during household contacts increased, which may contribute to an extended epidemic. The probability of scenarios was discussed in light of the official numbers and the H-UNCOVER representative survey. A correlation analysis between the two most likely scenarios and the registered infections was also completed. The 4A scenario was deemed to have the highest probability, which indicates a considerably earlier epidemic onset than the date of first official detection.

Bevezetés

Az emberi történelem sorsfordító eseményei között a járványokhoz kötődők előkelő helyet foglalnak el. Az érintettek száma és társadalmi-gazdasági hatásai miatt igen valószínű, hogy a SARS-CoV-2 vírus (továbbiakban koronavírus) okozta COVID-19 pandémiát is a XXI. század legnagyobb kihívásai közt fogjuk számon tartani. A múlt embereit sújtó számos járvánnyal szemben azonban most szerencsésebb helyzetből indulunk: a szakemberek a világ minden pontján nagy erőket mozgatnak meg azért, hogy megismerjék a vírus természetét, modellezzék és előre jelezzék terjedését, kutassák a védekezés lehetséges módjait, valamint feltárják a pandémia okozta szerteágazó társadalmi-gazdasági változásokat. Jelen tanulmányom alapját adó kutatás e törekvések sorát gyarapítja, arra vállalkozva, hogy az új típusú koronavírus-fertőzés első magyarországi hullámának tér- és időbeli lefutását különböző forgatókönyvek szerint modellezzék.

Ellentétben a járvány más aspektusaival foglalkozó hazai kutatások dicséretes mennyiségével (lásd Bereczki et al. 2020; Bessenyei 2020; Koós 2020; Kovács 2020; Kovács, Uzzoli 2020; Kovács et al. 2020; Lakatos et al. 2020; Rempert et al. 2020; Varjú 2020), a koronavírus hazai terjedésének modellezésével (és előrejelzésével) részletekbe menően foglalkozó kutatások száma csekélyebb (Szabó 2020). Ezek közül Röst Gergely és kutatótársainak munkája mindenképp kiemelendő (Röst et al. 2020). Kutatásukban a kompartment-modellek (vagy más néven rekeszmodellek) közé tartozó SEIR modell egy változatát használták. E modell a népességet elkülönülő csoportokba (rekeszekbe) osztja be (pl. fertőzésre fogékony, lappangó, fertőzőképes, gyógyult). A modell az egyes csoportok közötti átmeneteket a vírus epidemiológiai tulajdonságai alapján meghatározott differenciálegyenletekkel írja le. A SEIR modell a járványmodellezés talán legnépszerűbb eszköze, online változatai is elérhetőek (<https://research.physcon.uni-obuda.hu/COVID19MagyarEpi/>). Saját kutatásomat eltérő koncepcionális alpra helyeztem: ágens alapú módszertant használtam fel a koronavírus-fertőzés első hullámának modellezésére. Az ágens alapú módszertan következő fejezetben részletezett előnyei miatt kiválóan alkalmas területi modellezésre, és jól kiegészíti a kompartment-modelleken, illetve más megközelítéseken alapuló elemzések tapasztalatait.

Jelen tanulmányomban az ágens alapú modellezés elméleti alapjainak felvázolása után részletesen bemutatom a modellezéshez használt módszertanomat. Itt kitérek a lakónépesség aktivitási csoportokba osztásának menetére, a társas érintkezési módok számára és fertőzésátadás valószínűségére vonatkozó feltételezések megalkotására, a településközi kapcsolatháló felépítésére, valamint a vírus epidemiológiai tulajdonságaival kapcsolatban tett feltételezésekre. Ezután ismertetem a kialakított forgatókönyveket, valamint a modellbe épített korlátozásokat és önkorlátozásokat is. A kapott eredmények tényszerű ismertetése és az ebből eredő következtetések levonása után tanulmányom zárásaként összevetem modellfuttatásaimat a hivatalos fertőzésszámokkal, valamint a 2020. május 1. és május 16. között végrehajtott országosan reprezentatív H-UNCOVER felmérés tapasztalataival, és levonom a megfelelő konklúziókat.

A lefuttatott forgatókönyvek közül az alacsonyabb alap reprodukciós rátát ($R_0=2,66$), továbbá az első regisztrált hazai megbetegedéseket jelentősen megelőző fertőzéskezdetet feltételező forgatókönyvet ítéltam a legnagyobb valószínűségűnek. Mivel a korai terjedés mellett egyelőre nem szólnak szilárd bizonyítékok, ez egy figyelemreméltó eredmény, amit egyúttal kellő óvatossággal kell kezelni. A korlátozások nélküli forgatókönyvekben a munkahelyi társas érintkezések bizonyultak a legfontosabb terjesztői csatornának, a létrehozott aktivitási csoportok közül az ingázók, illetve az egyetemisták voltak leginkább kitéve a fertőzés veszélyének. Az eredmények visszaigazolták, hogy a korlátozások bevezetésével az effektív reprodukciós értéket minden társadalmi csoport esetében sikerült 1 alá szorítani. A különböző forgatókönyvek egyúttal felhívták rá a figyelmet, hogy a vírus a települések között elsősorban hierarchikus diffúziós mintát követve ter-

jed, akár nagy földrajzi távolságokat is áthidalva. Emellett a vonzaskörzeten belüli, ingázási kapcsolatokon keresztüli terjedés jelentőségét érdemes még kiemelni.

A tanulmányal kapcsolatban fontos hangsúlyozni, hogy az alapját képező kutatás a koronavírus első hulláma alatt, március-áprilisban zajlott. Ennek következtében a modellbe épített kulcshipotézisek (pl. a vírus epidemiológiai jellemzőivel kapcsolatban) a 2020 tavaszáig napvilágot látott korai eredményeken alapulnak. A kutatás lezárását követő időszakban a kialakított modellt alapjaiban érvénytelenítő új információkkal eddig nem találkoztam. Ennek ellenére előfordulhat, hogy az ismeretek folyamatos gyarapodásával a jövőben egyes feltételezések, döntések megkérdőjelezhetővé válnak. A kutatás lezárásakor eredményemet egy nagyobb léptékű műhelytanulmányban foglaltam össze (Lennert 2020). E műhelytanulmány további információkat szolgáltat a modellezési módszertannal kapcsolatos számos olyan részletről, amire jelen tanulmány keretei között nincs módom kitérni.

Az ágens alapú modellezés bemutatása

Az ágens alapú modellezés koncepciója és egyik ma is használt típusa (sejtautomata) Neumann Jánostól eredeztethető (Neumann 1966; Kovács, Takács 2003). A szimuláció alapegységei az egyéni cselekvők (ágensek). Ezek a modellfuttatás során autonóman létező entitások őket leíró egyedi adatokkal (attribútumok), valamint megadott viselkedési szabályokkal rendelkeznek. E viselkedési szabályok lehetnek egyszerűek vagy összetettek, determinisztikusak vagy sztochasztikusak. A kognitív ágensek csoportja tanulásra is képes – a modellfuttatás során szerzett tapasztalatai alapján módosítja viselkedési szabályait. Az ágensek leírására használt attribútumok, valamint a cselekvési szabályaik jellemzően a szimulálni kívánt kutatási problémából következő fókuszok és célok mentén fogalmazódnak meg. Az ágensek ezeknek megfelelően döntéseket hoznak, interakcióba lépnek egymással és a környezetükkel is, ezekre hatást gyakorolnak. Az ágensek heterogenitása általában kulcsfontosságú a modellezés szempontjából. Ez teszi lehetővé a közöttük zajló interakciókból makroszinten kibontakozó úgynevezett emergens jelenségek feltárását, amelyek az olyan komplex rendszerek jellemzői, mint például az emberi társadalom. Az ágens alapú modellek futtatása jellemzően több ciklusból tevődik össze, amelyek bizonyos mennyiségű eltelt időt jelképeznek. Az egyes ciklusokban az ágensek rendre ugyanazokkal a döntési helyzetekkel szembesülnek, ugyanolyan típusú cselekedeteket hajthatnak végre, eközben azonban a szimulált rendszer állapotában folyamatos változások mennek végbe (Billari et al. 2006; Tesfatsion 2006; Vág 2006).

Rugalmasságának és testreszabhatóságának köszönhetően az ágens alapú modellezés számos tudományterületen népszerű. Így például használják sejtbiológiai (Gorochowski 2016), ökológiai és környezettudományi kérdések elemzésé-

hez, gazdaságtudományi területen innovációs hálózatok (Heshmati, Lenz-Cesar 2013; Sebestyén, Varga 2019), illetve egyéb makroökonómiai és térgazdaságtani folyamatok vizsgálatához (Tesfatsion 2006; Fagiolo, Roventini 2017; Dawid et al. 2019), valamint demográfiai, illetve egyéb társadalomtudományi kérdések megválaszolására is (Billari et al. 2006; Grow, Bavel 2017). Ennek megfelelően az ágensek szimulálhatják különböző élőlénypopulációk egyedeit, a lakónépesség tagjait, de vállalatokat, illetve egyéb (intézményi) szereplőket is.

Az ágens alapú módszertant tulajdonságai alkalmassá teszik a járványos betegségek terjedésének modellezésére és előrejelzésére is. Előnyei közé tartozik, hogy heterogén ágensek létrehozásával viszonylag egyszerűen kivitelezhető a társadalom rétegződésének modellbe építése, eltérő viselkedési szabályok megalkotásával csoportspecifikus terjesztési valószínűségek kialakítása, a modellezési folyamat ciklikusságát kihasználva időben változó korlátozások életbe léptetése. A korábban említett emergens jelenségek szimulálása – jelen esetben egyéni interakciókból kibontakozó vírusterjedési mintázatok – szintén növeli a módszertan hozzáadott értékét. Amennyiben az ágensek definiált tulajdonságai lakóhelyre vonatkozó információt is tartalmaznak, illetve térbeli mozgásukkal kapcsolatos viselkedési szabályok is megállapíthatóak, úgy nagy területi részletességű modellezés is lehetővé válik. Az ágens alapú módszertannak talán ez a legnagyobb előnye a kompartment-modellekkel szemben.

Ezzel szemben az ágens alapú módszertan hátrányai közé tartozik nagy adat- és információigénye (ágensek tulajdonságai, viselkedési szabályok). Ráadásul ez az információigény teljes körű – pl. az ágensek egyes csoportjait érintő részleges adathiány esetén is muszáj kipótolni feltételezésekkel. Továbbá, bár léteznek ágens alapú modellek készítésére alkalmas programok, egyedi kutatási problémára modellt készíteni csak programozással lehetséges. Különösen (kevésbé optimalizált) egyedi kód esetén egy nagyszámú ágens viselkedését szimuláló modell futtatása igen nagy számítási kapacitást, illetve időt igényelhet. Összességében egy ágens alapú modell elkészítése a SEIR modelleknél lényegesen hosszabb időt vesz igénybe, ezért leginkább egy hosszabb periódus (pl. egy hullám) folyamatainak szimulálására alkalmas, nem pedig a gyorsan változó szabályozások és magatartásmintázatok hatásának naprakész lekövetésére.

A SARS-CoV-2 vírus terjedésére is készültek már ágens alapú szimulációk például Ausztrália (Rockett et al. 2020), Szingapúr (Koo et al. 2020) és az USA (Shamil et al. 2020) esetében. Hazánkban legjobb tudomásom szerint jelen kutatást bemutató műhelytanulmány volt az első, ami ezt a módszertant alkalmazta az új típusú koronavírus terjedésének vizsgálatára. Magyarországon emellett a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológiai és Bionikai Karának munkatársai foglalkoznak a koronavírus ágens alapú modellezésével. Virtuális Szegeted szimuláló modelljük a településeken belüli fertőzésterjesztési mintázatok feltérképezéséhez is kulcsfontosságú inputokat ad, valamint alkalmas különböző korlátozási, karantén és vakcinációs forgatókönyvek tesztelésére (Csikász-Nagy,

Pongor 2021; Reguly et al. 2021). E kutatócsoport a modell országos léptékű adaptációján is dolgozik.

Az elkészített modell alkotóelemei

Jelen modell ágensei Magyarország lakónépességének tagjait szimulálják. Összesen 9 337 328 ágenszt hoztam létre, a kiindulópontként szolgáló 2011-es népszámlálás eredményeinek megfelelően. A futtatás hat társas érintkezési módot különböztet meg, amelynek során a fertőzőképes egyének bizonyos valószínűséggel átadhatják a fertőzést:

- egy háztartásban élők érintkezése,
- iskolai, egyetemi tevékenység,
- munkahelyi tevékenység,
- mindennapi tevékenység (pl. bevásárlás, ügyintézés),
- szabadidős tevékenység,
- közösségi közlekedés.

Minden ágens egyedi azonosítókkal és az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik:

- lakótelepülés,
- nem,
- korcsoport,
- háztartástagok száma,
- vele egy háztartásban élők azonosítója,
- aktivitási csoport,
- fertőzőttégi státusz,
- megfertőződés időpontja.

A lakóhelyre, nemre és korcsoportra vonatkozó adatok forrása a 2011-es népszámlálás településsoros adattáblája, a lakossági tábla adattartalma e három adatsor tekintetében megegyezik az eredeti adatközléssel. A háztartási kapcsolatok kialakításának alapja a 2011-es népszámlálás családokat családösszetétel és a gyermekek száma szerint csoportosító településsoros állománya. Ahhoz, hogy az adott település ágenseit besoroljam az egyes családtípusokba, az alábbi algoritmust használtam: megállapítottam egy optimális kort a különböző családösszetételű családok családtagjainak, valamint egy optimális koreltérést a családtagok között. Az adott település ágensei közül az algoritmus először megpróbált olyan ágenseket összepárosítani, amelyek az optimális korosztályokba estek. Amennyiben nem talált eleget, újra és újra bejárta az ágenstáblát, minden iteráció során egyre nagyobb eltérést engedve az optimalistól, amíg minden egyes családtípusból megfelelő számút nem hozott létre. A kimaradó lakosokat meghagyta egyedülállóknak. Ez a hozzárendelési algoritmus a modellezési céloknak megfelelő közelítéssel visszaadja a háztartások átlagos méretét, és a magyar háztartásállomány nem és kor szerinti sajátosságait. Továbbá minden ágenszt besoroltam az alábbi nyolc aktivitási csoport egyikébe:

- 3 év alatti,
- óvodás, általános iskolás,
- középiskolás,
- egyetemista,
- ingázó munkavállaló,
- helyben dolgozó munkavállaló,
- aktív korú munkanélküli, inaktív, eltartott, valamint távmunkában dolgozó,
- időskorú.

A különböző aktivitási csoportokba tartozó ágensek társas érintkezési profilja eltér egymástól, és a futtatás során eltérő korlátozási szabályok vonatkozhatnak rájuk. Az aktivitási csoportokba sorolás többlépcsős metódus szerint történt. Egyes aktivitási csoportok (pl. időskorú) direkt módon levezethetők az ágens korcsoportjából. A valós helyzetet leegyszerűsítve a középiskolás és az egyetemista népesség tekintetében a 15-19 és a 20-24 éves korcsoportokat tekintettem érintett korosztálynak. Mivel a településállomány erősen differenciált közép- és felsőfokú oktatásbeli részvétel szerint, az országos adatokból következő arányokat (a 15-19 éves korcsoport 70, illetve a 20-24 éves korcsoport 30 százaléka) súlyoztam egy településsoros jövedelemkülönbség-indexszel. Ezen index azt mutatja meg, hogy az egy főre jutó összevont szja-alapot képező jövedelem összege mennyiben tér el az országos átlagtól (az adatsor a TeIR-ből lett lekérve, adatszolgáltató: NAV). A családok anyagi helyzete önmagában is jelentős hatást gyakorol a továbbtanulási döntésekre. Ugyanakkor a jövedelemkülönbség-index az adott település tágabban vett társadalmi-gazdasági helyzetének is indikátora, így számos egyéb továbbtanulási valószínűséget befolyásoló tényezőről (településhálózaton belüli pozíció, szülői végzettség, roma lakosság aránya) is szolgáltat információt (Bukodi 1999; Hermann 2003; Polónyi 2014). A munkaerőpiaci aktivitás alapján képzett csoportok esetén szintén a 2011-es népszámlálás településsoros adatai szolgáltak kiindulópontul, korrigálva a foglalkoztatottak számának azóta bekövetkezett jelentős bővülésével (a 15-64 évesek körében 3 911 ezerről 4 440 ezerre), illetve az ingázók számának csökkenésével (1 361 ezerről 1 251 ezerre). Figyelembe vettem a már korábban távmunkában dolgozók számát is (KSH 2020).

Az egyes aktivitási csoportok különböző érintkezési formák esetén feltételezett napi átlagos kapcsolatszámait az 1. táblázat tartalmazza. Ezen értékek kialakításához igyekeztem az elérhető statisztikai adatokra (pl. osztályok átlagos létszáma, munkahelyek alkalmazottak száma szerinti tagolódása, ingázók és helyben dolgozók által használt közlekedési eszközök megoszlása), valamint egyéb információforrásokra (Rabovszky 2009; Neulinger, Kenesei 2016; Hámori, Horváth 2018; Fehérvári, Szemerszki 2019; trademagazin.hu 2017) támaszkodni. Ám részleges vagy teljes adathiány miatt több ponton kénytelen voltam becsléseket tenni. A kiindulópontként szolgáló adatokról és információkról, valamint az egyes becslések mögötti megfontolásokról részletesen beszámolok a hivatkozott műhelytanulmányban (Lennert 2020, 36-39.).

1. táblázat: A napi átlagos fertőzés átadására alkalmas társas érintkezések modellfuttatáshoz felhasznált értéke a korlátozások bevezetése előtt, tünetmentes és tünetekkel rendelkező fertőzőknél (zárójelben), aktivitási csoportok szerint

The number of different types of contacts with a risk of infection, before the implementation of the restraints, for asymptomatic and symptomatic spreaders (in parentheses), by activity group

	<i>Iskola, egyetem</i>	<i>Munka</i>	<i>Mindennapi</i>	<i>Szabadidő</i>	<i>Közlekedés</i>
3 év alatti	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	0 (0)
Óvodás, általános iskolás	15 (12)	0 (0)	0 (0)	2 (2)	6 (5)
Középfiskolás	21 (16)	0 (0)	3 (3)	4 (3)	15 (12)
Egyetemista	45 (30)	9 (6)	5 (3)	6 (4)	19 (14)
Ingázó munkavállaló	0 (0)	26 (17)	5 (3)	4 (3)	14 (9)
Helyben dolgozó munkavállaló	0 (0)	26 (17)	5 (3)	4 (3)	6 (4)
Aktív korú munka nélkül	0 (0)	0 (0)	5 (3)	4 (3)	7 (5)
Időskorú	0 (0)	1 (1)	3 (2)	3 (2)	7 (5)

Forrás: Rabovszky 2009; Neulinger, Kenesei 2016; Hámori, Horváth 2018; Fehérvári, Szemerszki 2019; trademagazin.hu 2017, valamint a KSH adatai felhasználásával a szerző szerkesztése

A fertőzés lefolyásának szakaszai az ágensek fertőzöttségi státusz tulajdonosságában kerülnek rögzítésre. A fertőzéslefordalással kapcsolatban a kutatás idején elérhető epidemiológiai információkat vettem figyelembe. Ezek a korai vizsgálatok sok esetben kis esetszámú vizsgálaton alapulnak, ezért eredményeiknek jelentős a szórása és a bizonytalansága. Kezdetben a lakosság 100 százaléka fertőzésre fogékony, nem feltételeztem természetes immunitást (Li, H. et al. 2020). A fertőzéstől az első tünetek megjelenéséig terjedő lappangási időszakot egyes összefoglalók négy-nyolc napra (Han et al. 2020), mások átlagosan hat napra becsülik (Lai et al. 2020). A vírus két olyan tulajdonsággal is rendelkezik, amelyek nagyon megnehezítik a hatékony védekezést: a fertőzöttek a tünetek jelentkezése előtt egy-három nappal képesek átadni a fertőzést (preszimptomatikus terjesztés) (Du et al. 2020; Wei et al. 2020), valamint a fertőzöttek egy része a betegség teljes lefordalása során tünetmentes fertőző marad (aszimptomatikus terjesztés). A tünetmentesen lezajló fertőzések arányát több tanulmány is 20% körüli teszi (Wang et al. 2020; Mizumoto et al. 2020; Dong et al. 2020; Tao et al. 2020). Egy német kutatócsoport szerint a fertőzőképesség csúcsa igen korán, a tünetek megjelenését követő öt nap előtt következik be, utána fokozatosan csökken (Wölfel et al. 2020).

A fentiek figyelembevételével a fertőzés előrehaladásának szabályait a következőképpen határoztam meg:

- a megfertőződött lakosok az első négy napot nem fertőzőképes, lappangó állapotban töltik, majd a negyedik nap végén válnak tünetmentes fertőzővé;

- ezután két napot tünetmentes fertőzőként töltenek el;
- a hatodik nap végén a fertőzöttek 80 százaléka tüneteket mutató fertőzőkké válik;
- a megfertőződöttek 20 százaléka végig tünetmentes fertőző marad;
- a megfertőződés utáni 16. nap végén mind a tünetmentes, mind a tüneteket mutató fertőző a modellezés szempontjából fertőzősen átesett lakos lesz, nem adja tovább a fertőzést, és nem képes újrafertőződni.

A korcsoportok között jelentős különbségek mutatkoznak abban, hogy a betegség milyen arányban folyik le enyhe tünetekkel, vagy válik súlyossá (Wang et al. 2020; Mizumoto et al. 2020; Dong et al. 2020; Tao et al. 2020; Cruz, Zeichner 2020; CDC COVID-19 Response Team 2020; vox.com 2020). A fiatalokat tömörítő első négy aktivitási csoportban nagyobb a betegségen csupán enyhe tünetekkel átesők aránya, mint az aktív korú munkavállalói csoportokban, és az időskorúak esetén a legnagyobb a közepes vagy súlyos tünetekkel lezajló fertőzés. Kiinduló feltételezésem volt, hogy a magukon betegség jeleit tapasztalók már a járványhelyzet felismerése előtt, külső korlátozások nélkül is csökkentik aktivitásukat, azonban a csupán enyhe tüneteket mutatók kevésbé változtatnak életvitelükön. Ennek fényében aktivitási csoportonként differenciáltan csökkentettem a társas érintkezések számát a tüneteket mutató fertőzők esetében (lásd 1. táblázat).

Fontos leszögezni, hogy a megfertőződött lakosok a 16. nap után csak a modellezés szempontjából válnak fertőzősen átesetté. Az akkor elérhető információk alapján a vírusszórás viszonylag gyors lecsengését feltételeztem a modellezés során. Azonban empirikus példák sora bizonyítja, hogy különösen a súlyos tüneteket mutató betegeknel ennél jóval hosszabb idő is eltelhet, amíg valóban gyógyulnak tekinthetők. Továbbá a fertőzés végkimenetelére (gyógyulás vagy halálozás) vonatkozóan nem teszek feltételezéseket. Ennek oka, hogy a letragikusabb végkimenetel aránya alapvetően függ az egészségügy felkészültségétől, az ellátás megszervezésétől és a protokolloktól, valamint az országos és helyi kapacitásoktól. Ezekre vonatkozóan nem rendelkezttem elég információval ahhoz, hogy becslésekbe merjek bocsátkozni, ezért a fertőzősen átesett lakos kifejezést semleges értelemben használom.

Az R_0 (alap reprodukciós) érték meghatározza, hogy a fertőzés megállítására irányuló intézkedések hiányában egy tipikus egyedi eset hány másodlagos fertőzést okoz egy olyan népességben, amelynek nincs immunitása a betegségre (Li, H. et al. 2020). Amennyiben az alap reprodukciós érték 1-nél nagyobb, korlátozások nélkül a vírus exponenciális terjedése várható. A korai becslések által megadott R_0 tartomány: 2,24 – 3,58 (Zhao et al. 2020). Ezen a tartományon belül esik a több független számítás alapján megkapott, a legáltalánosabban elfogadott és mások által is legtöbbször használt 2,68-as érték (Han et al. 2020; Lai et al. 2020), egyes számítások azonban ennél magasabb, 3,28-as értéket kaptak (Li, H. et al. 2020; Liu et al. 2020). Ennek feloldására két különböző alap reprodukciós rátát kifejező forogatókönyv-változatot készítettem.

Ezek a célértékek nem közvetlenül, hanem a kapcsolattípusok szerint definiált napi átlagos társas érintkezések esetében létrejövő fertőzésátadás valószínűségén keresztül épülnek be a modellbe. Kiindulópontként szolgált, hogy egy kutatás szerint a fertőzöttek közeli kapcsolatainknak 35 százalékos valószínűséggel adják tovább a fertőzést (Liu, Eggo, Kucharski 2020), ami összhangban van a korábbi influenzajárványok vizsgálatának eredményével (Yom-Tov et al. 2015). A nem háztartástagok közötti fertőzésátadás valószínűsége ennél lényegesen alacsonyabb (Jing et al. 2020). A fentiekből kiindulva, valamint feltételezve, hogy a tüneteket mutató fertőzők esetében a jellemző légúti tünetek intenzívebb vírusszóráshoz és megnövekedő fertőzésveszélyhez vezetnek, a következő egy társas érintkezésre jutó fertőzésátadási valószínűségeket használtam a modellezés során (2. táblázat). Az adott kapcsolat esetén történő átadás valószínűségét aktivitási csoportok szerint nem, csak a fertőzés lefolyása szerint differenciáltam. Egyedül az egyetemisták háztartáson belüli fertőzésátadási valószínűsége esetében tettem kivételt, ahol a modellfuttatás kezdetekor más társadalmi csoportokhoz képest feleakkora értékkel ellensúlyoztam azt, hogy az egyetemisták jelentős része – bár még a szülői otthonba van bejelentve – gyakorlatban nem él családjával egy háztartásban. Két változatot alakítottam ki, az első a teljes társadalomra vetítve az $R_0=2,66$ alap reprodukciós értéket, a második az $R_0=3,25$ -ös értéket eredményezi.

2. táblázat: A modellezés során használt egy kapcsolatra eső, százalékban megadott átlagos fertőzésátadási esély a korlátozásokat megelőzően, tünetmentes, és tünetekkel rendelkező fertőzőknél, az $R_0=2,66$ alap reprodukciós értékű, illetve az $R_0=3,25$ reprodukciós értékű forgatókönyv szerint

The chance of infection per contact for asymptomatic and symptomatic spreaders, for scenarios with a base reproduction number of 2.66 and 3.25

		szabadidő	intenzív, tünetes, munkahelyi tevékenység, közlekedés
$R_0=2,66$	Tünetmentes	1,7%	0,57%
	Tüneteket mutató	3,4%	1,13%
$R_0=3,25$	Tünetmentes	1,6%	0,80%
	Tüneteket mutató	3,2%	1,60%

Forrás: a szerző számításai

A kutatás lezárása óta megjelent tanulmányok egy része megerősíti az akkor elérhető információk alapján tett feltételezések helyességét (Buitrago-Garcia et al. 2020; Cevik et al. 2020). Az újabb kutatások bővebb bizonyítékot szolgáltattak az olyan, akkor még csak anekdotikus szinten tárgyalt jelenségekre is, mint a többszöri újrafertőződés lehetősége (Tillett et al. 2020). A többszöri újrafertőződés lehetőségét ugyan nem építettem be a modellbe, de ez alapjaiban nem kérdőjelezi meg az eredményeket. Ennek oka egyrészt, hogy a fertőzés után hosszabb-rövidebb ideig kialakuló immunitás a fertőzésen átesettek többségének az első hullám idejére még védelmet nyújthatott, másrészt pedig a fertőzésszám az első hullám esetén nem közelítette meg azt

a szintet, ahol az immunitás megléte vagy hiánya jelentősen befolyásolta volna a vírus terjedését.

A modellfuttatás lépései

Az ágens alapú modellezésre jellemző módon a modell futtatása ciklusokra bomlik, amelyek egy-egy eltelt napot jelképeznek. Az egyes ciklusokban rendre ugyanaz az öt fázis kerül végrehajtásra:

1. *Az új hatósági és lakossági korlátozások bevezetése* (amennyiben van).
2. *Külföldről származó koronavírus-fertőzések megjelenése*: a fertőzés terjedésének kiindulópontja külföldről behurcolt fertőzés (hazánkba látogató fertőzőképes külföldi, külföldön megfertőződött magyar állampolgár). Ebben a fázisban a program minden ciklusban az egyes forgatókönyvek által meghatározott szabályok szerint bizonyos számú ágens fertőzöttségi állapotát megfertőzötté változtatja. Ezen ágensek aztán négy ciklus múlva a következő fázis során már maguk is továbbadhatják a fertőzést. A program a határzár napjáig minden ciklusban újabb külső forrásból származó megfertőzödések hoz létre.
3. *Fertőzőképes lakosok esetleges fertőzésátadása*: A fertőzőképes ágensek az adott (átlagos napot jelképező) ciklusban aktivitási csoportjuknak megfelelően bizonyos számú és jellegű fertőzésátadásra alkalmas társas érintkezésben vesznek részt (lásd 1. táblázat), és abban bizonyos eséllyel átadják a fertőzést (2. táblázat). Az ágensek kitettsége nem azonos. Aktivitási profiljuk sok esetben eleve kizárja őket a potenciálisan érintett lakosok közül (pl. nem lehetnek iskolai fertőzés alanyai). Azt is figyelembe vettem továbbá, hogy a társas érintkezések egy része létrejöhet mind a fertőzőképes személy, mind a fertőzésnek kitett személy lakótelepülésén kívül is. Ehhez szükség volt az iskolai, egyetemi, munkahelyi, mindennapi és szabadidős tevékenységek esetében településhatárokon átnyúló kapcsolatháló alkotni. Ennek megalakításához a hasonló problémák számszerűsítéséhez előszeretettel alkalmazott gravitációs modellt adaptáltam (Dusek 2003). Az ingázásra, szabadidős és mindennapi kapcsolatok leírására a gravitációs modell leghagyományosabb adaptációját követve a települések népességét használtam a tömeg mutatójaként, míg az oktatási kapcsolatok esetében a települések tanulói-
nak, hallgatóinak számát. A települések légvonalbeli távolságát kifejező mutatót használtam távolságként, az egyes kapcsolatok eltérő távolságérzékenységétől (általános iskolától egyetemig) függően eltérő hatványkitevővel dolgozva. A fenti megfontolásoknak megfelelő ágensek csoportjából véletlenszám-generálás segítségével választja ki a program azt, akivel létrejön a kapcsolat. A fertőzés átadásának valószínűségi eseménye szintén véletlenszám-generálás révén dől el.

4. A változások település- és korcsoportszintű összegzése.
5. A fertőzöttségi státusz megváltozása a fertőzött lakosokban: ekkor hajtódnak végre a megfelelő számú ciklus eltelte esetén a fertőzöttségi státuszváltozások (pl. az ágens fertőzőképessé, vagy fertőzésen átesetté válik, lásd fentebb), és a következő ciklusban már eszerint vesz részt.

Az ötödik fázis végrehajtása után új ciklus (új nap) kezdődik. A modell a megfelelő beállításokkal tetszőleges számú ciklusig futtatható.

Az elkészített forgatókönyvek leírása

A fertőzésterjedés vizsgálatához 12 forgatókönyvet alakítottam ki, amelyek eltérhetnek aszerint, hogy mekkora a feltételezett alap reprodukciós ráta (R_0), hogy a külföldi forrásból származó fertőzések az ország mely részén jelennek meg, továbbá életbe lépnek-e a modellfuttatás során fertőzést korlátozó szabályok, és ha igen, a fertőzés kezdetétől számítva milyen késéssel (3. táblázat).

A feltételezett alap reprodukciós ráta esetében két különböző forgatókönyv-változatot készítettem: az 1-4 forgatókönyvek esetében egy fertőzött korlátozások nélkül hosszú távon átlagosan 2,66 embernek adja át a fertőző a vírust, míg az 5-7 forgatókönyvek esetében ez az érték 3,25.

A terjedés területi mintázatainak részletesebb vizsgálatához az forgatókönyvek egy részében a külső forrásból származó fertőzéseket véletlenszerűen osztottam szét az országban (A verziók), más részében kizárólag Budapestre koncentráltam őket (B verziók). Végeztem továbbá egy kísérletet is, amiben egyetlen külföldi forrásból származó fertőzéssel indítottam el a modellezést, amit Felsőszölnökön, az ország legnyugatibb fekvésű, periferikus településén helyeztem el (1C).

Az egyes forgatókönyvek eltérnek a modellfuttatás kezdőnapjában és ezáltal a korlátozások időbeli késleltetésében is. Az 1-es és 5-ös forgatókönyvek esetében nem léptettem életbe a fertőzésterjedést korlátozó szabályokat – ezek tekinthetőek viszonyítási pontként szolgáló alapfuttatásoknak is. A 2-es és 6-os számozású forgatókönyvek esetében azzal az optimista feltételezéssel éltem, hogy a rendszeres megfertőzések kezdő időpontja nem előzte meg számottevően a fertőzés regisztrált megjelenését. Magyarországon az első fertőzéseket március 4-én regisztrálták, és az érintett, Iránba hazalátogató hallgatók február 22-én, illetve 28-án már minden bizonnyal megfertőződve érkeztek vissza hazánkba (hirado.hu 2020). Ezért e forgatókönyvekben február 25-ét választottam a futtatás első napjának, és napi öt külső forrásból származó fertőzéssel számoltam.

Február 20. környékén a vírus Olaszországban már belső forrásból terjedt, és lokális fertőzés-gócok keletkeztek Lombardia és Veneto tartományokban (reuters.com 2020). Ennek fényében nem zárható ki annak a lehetősége, hogy a vírus terjedése Magyarországon is korábban kezdődhetett az 1-es és 5-ös számú forgatókönyvben használt legoptimistább dátumnál, csak a kezdeti alacsony esetszá-

mok mellett észrevétlen maradt. A 3-as és 7-es forgatókönyvek esetében a külső forrásból származó fertőzések megkezdődését egy héttel korábbra hozom, a modell futtatását február 18-tól kezdve.

Végül az első eredmények fényében kísérletet tettem egy olyan forgatókönyvvel is, ami az első külső fertőzések megjelenését ennél jóval korábbi időpontra teszi. A 4A forgatókönyv január 20-tól indítja a futtatást, az első hónapban viszont csak szórványos külső forrásból származó megfertőződéssel számol (napi egy fő). E forgatókönyv realitását hivatalos adatok (regisztrált fertőzöttek hazánkban vagy a környező országokban) nem támasztják alá, így létjogosultsága mindenképp indokolandó. Európában elsőként Franciaországban, január 24-én regisztrálták az első három fertőzöttet, akik 22-én, illetve 18-án tértek haza Kínából (news.sky.com 2020). Január végéig Németországban, Finnországban, Olaszországban, Spanyolországban, Svédországban, az Egyesült Királyságban és Oroszországban is regisztráltak fertőzötteket, akik jellemzően Kínából érkező (ill. visszaérkező) személyek voltak (ecdc.europa.eu 2020). Li és szerzőtársai (Li, R. et al. 2020) azonban felhívták arra a figyelmet, hogy a Kínában január 23-án bevezetett szigorított intézkedéseket és utazási korlátozásokat megelőzően a fertőzések 86 százaléka feltáratlan maradhatott. Li és szerzőtársainak eredményei, a fertőzés korai kiterjedésére vonatkozó becslések és a nemzetközi utazási adatok alapján valószínűsíthető, hogy a vírus január derekára már több Kínán kívüli városban is megvetette a lábát (nytimes.com 2020). Érdemes azt is figyelembe venni, hogy az európai országok jellemzően csak január végén hozták az első intézkedéseket a behurcolás ellen, és a szűrési protokollok is folyamatosan csiszolódtak az ismeretek gyarapodásával. Magyarországon az operatív törzs akcióterve január 31-én jelent meg (koronavirus.gov.hu 2020a). Éppen ezért egy korai behurcolás nagyobb eséllyel maradhatott észrevétlen. Említést lehet még tenni az igen bizonytalan állításokról is, amelyek felvetik annak a lehetőségét, hogy akár már a járványveszély hivatalos elismerése (2019. december 31.) előtt is behurcolhatták a vírust Európába. Ide sorolhatóak a vuhani utazást követően a koronavírus tüneteinek átesett emberek anekdotikus beszámolóit (bbc.com 2020), közéjük tartoznak a Vuhani Katonai Világtéjátékok egyes résztvevői is (hvg.hu 2020a). Elgondolkodta-

3. táblázat: A használt forgatókönyvek nomenklatúrája

	<i>The nomenclature of the scenarios</i>		
	Véletlenszerű kiindulópont	1A	5A
Nem korlátozott terjedés	Budapesti kiindulópont	1B	5B
	Periferikus kiindulópont	1C	
Terjedés február 25-ei kezdettel	Véletlenszerű kiindulópont	2A	6A
	Budapesti kiindulópont	2B	
Terjedés február 18-ai kezdettel	Véletlenszerű kiindulópont	3A	7A
	Budapesti kiindulópont	3B	
Terjedés január 20-ai kezdettel	Véletlenszerű kiindulópont	4A	

tó eredmény továbbá a kórokozó utólagos azonosítása egy 2019 decemberében koronavírusra jellemző tünetekkel kórházba kerülő francia betegről vett mintából (Deslandes et al. 2020). A fentiek fényében ezért e forgatókönyvre úgy tekintek, mint egy semmiképp sem bizonyított, de nem is teljességgel kizárható lehetőség-re. Ez rávilágít az alkalmazott scenárióalapú módszertan egyik pozitív hozadé-kára, hogy több forgatókönyv párhuzamos vizsgálatára is lehetőséget ad a valószínűtől az egészen valószínűtlenig.

A modellbe épített korlátozások

Mint a forgatókönyvek leírásánál olvasható volt, az 1-es és 5-ös scenáriók kivéte-lével bizonyos idő eltelte után a társadalmi érintkezések számát, és az egy érintke-zésre eső fertőzésátadás valószínűségét csökkentő szabályokat vezettem be. E szabályok igyekeznek minél jobban lekövetni a valóságban lezajlott hatósági és ön-korlátozásokat, így fokozatosan szigorodva az alábbi napokon léptek életbe:

- Március 12.: az egyetemisták oktatási (és kapcsolódó közlekedési) kapcso-latai megszűnnek (viszont megnövekszik az esélye, hogy továbbadják a fertőzést családtagjuknak).
- Március 14.: az általános tanítási szünettel összhangban minden iskolai aktivitás megszűnik, a járvány elkezd éreztetni hatását a munkaerőpia-con is, a Wazestats közlekedési adatai alapján megkezdődik a mobilitás gyors visszaesése (wazestats.com 2020).
- Március 17.: életbe lép a határzár, megszűnik a külhoni forrásból származó megfertőződés lehetősége, szűkülnek a szabadidős lehetőségek (szórakozó-helyek, mozik, kulturális intézmények bezárása). A Wazestats adatai alapján ekkorra a forgalom a megszokott érték kevesebb, mint 50 százaléka.
- Március 28.: a kijárási korlátozások bevezetése, tovább csökkenő minden-napi és szabadidős kapcsolatok. A Wazestats alapján a forgalom beállt a korábbi 25-30 százalékára.
- Április 4.: A munkával járó személyes kapcsolatok számának csökkenése befejeződik, és a modellezés végéig fennmaradó értékre csökken. Az Ipsos április első hetében történt adatfelvétele alapján már csak a lakosság 40 százaléka jár be a munkahelyére (ipsos.com 2020). A közlekedési fertő-zésátadás minimális, a MÁV 80 százalékos forgalomcsökkenésről számolt be (hvg.hu 2020b). Az üzletek egy részében bevezetett intézkedések (pl. létszámkorlát) és a növekvő tudatosság hatására a mindennapi tevé-kenységek során bekövetkező kapcsolatok száma és létrejövő kapcsolatok esetén a fertőzésátadás valószínűsége is csökken. A modellezés az ekkor beállított paraméterekkel fut a továbbiakban.

A 4. táblázat példákat hoz arra, hogy a modellben fokozatosan életbe léptetett korlátozások milyen mértékben csökkentik a fertőzés átadására alkalmas társas

4. táblázat: A fertőzés átadására alkalmas társas érintkezések számának visszaesése a fokozatosan életbe léptetett korlátozások hatására, tünetmentes fertőzők esetén (futtatás kezdete = 100%)

Reduction in social contacts with infection potential, following the gradually implemented restrictions (start of the run = 100%)

	Márc. 12.	Márc. 14.	Márc. 17.	Márc. 28.	Apr. 4.
Általános és középiskola	100%	0%	0%	0%	0%
Egyetem	0%	0%	0%	0%	0%
Munkahely (5-6. aktivitási csoportok)	100%	90%	70%	60%	30%
Mindennapi tevékenység (5-7. aktivitási csoportok)	100%	90%	80%	50%	30%
Szabadidős tevékenység (5-7. aktivitási csoportok)	90%	60%	60%	30%	20%

Forrás: a szerző számításai

érintkezések számát. Egyes érintkezési formák teljesen megszűnnek (pl. távoktatásra való áttérés miatt), más esetekben csak részleges csökkenést építettem a modellbe. Ennek hajtóereje nem kizárólag a tevékenység szüneteltetése (táv munkára áttérés), hanem pl. az aktivitás közben előírt távolságtartási szabályok, a munkarendben történő változások bevezetése is. A tüneteket mutató fertőzőképes ágens esetében nagyobb mértékű visszaesést feltételeztem, valamint a kontaktusszámon túlmenően a fertőzésátadás valószínűségében is csökkenést léptettem életbe (maszkviselési, higiéniai szabályok). Összességében a korlátozások realizált fékezőerejével kapcsolatban inkább optimista feltételezésekkel éltem.

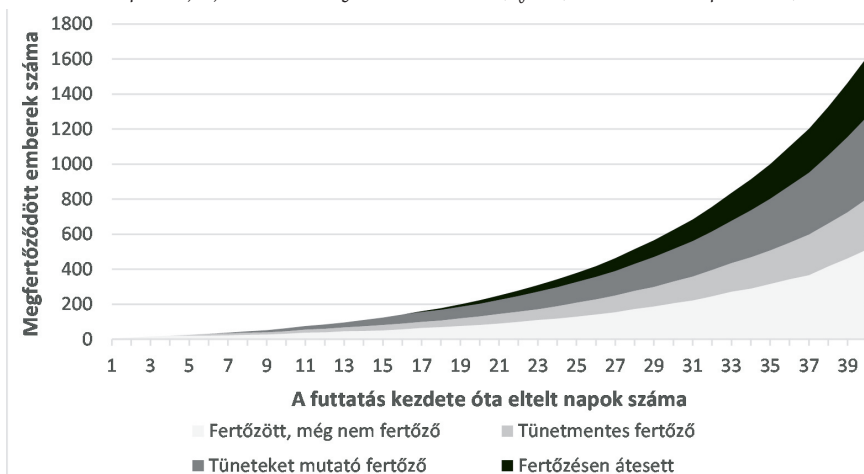
Mivel az egyes forgatókönyvek indítási ideje eltér egymástól, ezért a korlátozások időbeli késleltetése eltérő: a 2A, 2B és a 6A forgatókönyvek esetében a korlátozások a 17., 19., 22., 33. és a 40. napokon, míg a 3A, 3B és a 7A forgatókönyvek esetében a bemutatott szabályváltozások a 24., 26., 29., 40., és a 47. napokon lépnek életbe. Mivel a 4A forgatókönyv alaphipotézise szerint igen korán, már január 20-án bekövetkezik az első megfertőződés, így a korlátozások a fertőzés kezdetéhez képest igen későn, az 53., 55., 58., 69., és 76. napokon lépnek életbe.

Eredmények

A korlátozások nélküli terjedést szimuláló forgatókönyvek kiválóan alkalmasak a terjedés alapsajátosságainak elemzésére. E forgatókönyvek futtatása esetében az eredmények az elvárható exponenciális görbét rajzolják ki (1. ábra), az időszak végére a külföldi tapasztalatokkal egybevágó hat napos duplázódással (Wu, Leung, Leung 2020). A fertőzésszám ugrásszerű növekedése az idő múlásával szintén megfelel a mások által is leírtaknak. A futtatás fontos tanulsága, hogy (a magas reprodukciós ráta miatt) egy adott időpillanatban a már megfertőződött, de még nem aktív fertőző emberek száma megközelíti az aktív fertőző embereket (40. napon 512 a 757-tel szemben).

1. ábra: A megfertőződött emberek számának alakulása az 1A forgatókönyv ($R_0=2,66$; korlátok nélküli terjedés) futtatása alapján

The spread of infection according to the 1A scenario ($R_0=2.66$; no restrictions implemented)

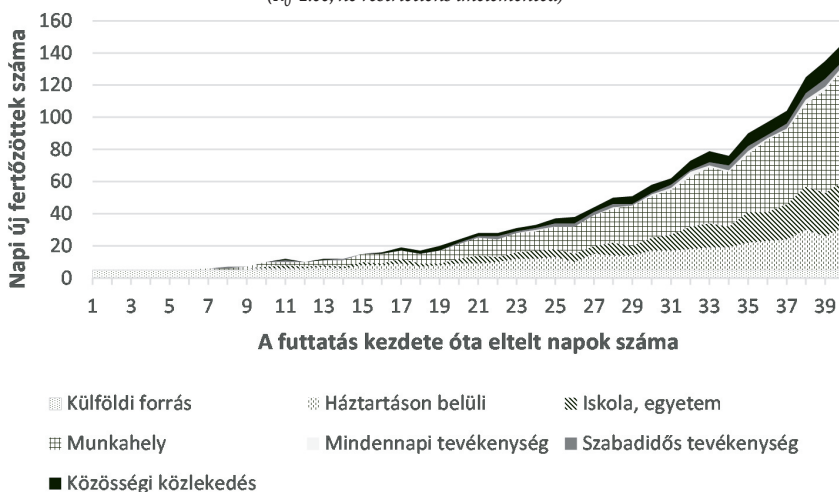


Forrás: a szerző szerkesztése

A forgatókönyv külföldi forrásból származó fertőzésekkel indította be terjedést, azonban a 2. ábrán jól látható, hogy a más forrásból származó fertőzések milyen hamar átveszik a szerepet a fertőzés továbbterjesztésében (a 40. nap végére elhanyagolhatóvá téve a külső forrásból származó fertőzések hatását). A kapott eredmények a munkahelyen történő fertőzések elsődlegességét mutatják a

2. ábra: A napi új fertőzések megoszlása a fertőzés forrása szerint az 1A forgatókönyv ($R_0=2,66$; korlátok nélküli terjedés) futtatása alapján

The distribution of new infections by social contact type according to the 1A scenario ($R_0=2.66$; no restrictions implemented)



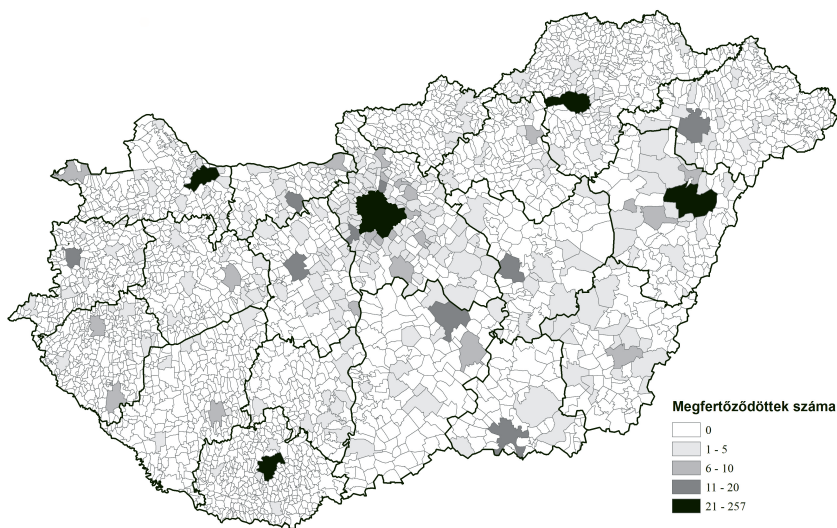
Forrás: a szerző szerkesztése

fertőzés továbbterjesztésében (az aktivitásban résztvevő népesség nagy száma, jelentős számú napi kapcsolat, közepes valószínűségű fertőzésátadás), ezt követi az iskolai, illetve a háztartáson belüli fertőzésátadás.

Ha megvizsgáljuk a fertőzés terjedésének területi mintázatát az 1A, 1B és 1C forgatókönyvek esetében, értékes következtetéseket vonhatunk le. Az A forgatókönyv a fertőzés kiindulópontjait egyenlően osztotta el a lakónépességben, ennek ellenére a 40. nap végére az összes megfertőződött a lakónépességen belüli arányánál magasabb arányban van jelen Budapesten és a megyei jogú városokban. Ez rávilágít arra, hogy a településhierarchia csúcsán álló települések jelentőségtöbblete a társas érintkezések számára is kiterjed, ami a fertőzésszám koncentrációjához vezet. Ennek köszönhetően a kisebb, vidéki települések jó részében a 40. napon még korlátlan terjedés esetén sem lenne jelen a fertőzés (3. ábra).

3. ábra: A megfertőződött emberek száma az egyes településeken a 40. napon az 1A forgatókönyv ($R_0=2,66$; korlátok nélküli terjedés, külföldi forrásból származó fertőzések véletlenszerűen elosztva) 5 futtatásának átlagolása alapján

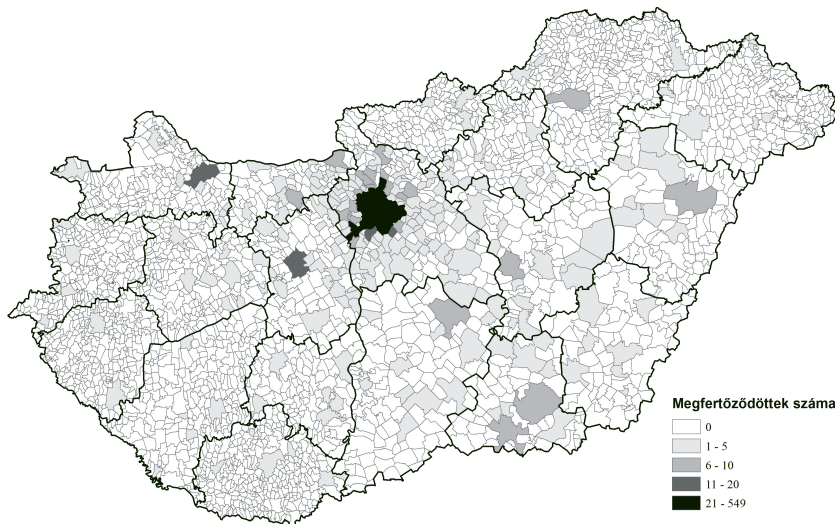
The number of infected people on the 40th day by municipalities, according to the 1A scenario ($R_0=2,66$; no restrictions implemented; foreign infections distributed randomly; mean results of 5 run)



Forrás: a szerző szerkesztése

A térbeli koncentráció csak egy bizonyos fokig tart – mint azt a budapesti kiindulópontokat használó 1B forgatókönyv futtatása mutatja. E forgatókönyv esetében a 40. nap végén a megfertőzöttek 44 százaléka budapesti lakos volt, ami kiugróan magas az 1A forgatókönyvhöz képest. Ez azonban azt is jelenti, hogy a kezdeti fertőzések kizárólagos fővárosi koncentrációja ellenére a 40. napra a megfertőzöttek többsége már Budapesten kívülről kerül ki. A 4. ábra jól illusztrálja, hogy a vírus a fővárosból kiindulva egyrészt távoli regionális központokat is elvérvé, hierarchikus diffúzióval terjedt – ahogy arra például Kiss János Péter

4. ábra: A megfertőződött emberek száma az egyes településeken a 40. napon az 1B forgatókönyv ($R_0=2,66$; korlátok nélküli terjedés, külföldi forrásból származó fertőzések Budapestre koncentrálvá elosztva) 5 futtatásának átlagolása alapján
The number of infected people on the 40th day by municipalities, according to the 1B scenario ($R_0=2.66$; no restrictions implemented; foreign infections concentrated on Budapest; mean results of 5 run)



Forrás: a szerző szerkesztése

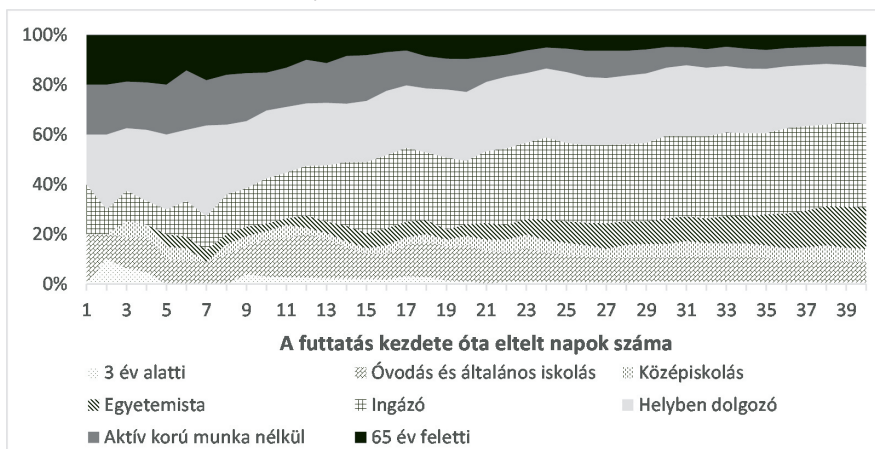
(2020) is felhívta a figyelmet –, másrészt az ingázási kapcsolatokon az agglomerációs gyűrű településeit is érintette.

Az 1C forgatókönyv még inkább rávilágít a településhierarchia szerepére a vírus terjedésében. Ebben a scenárióban azt az egyébként teljesen életszerűtlen szituációt modelleztem, mi történik akkor, ha csupán egy külföldi forrásból származó fertőzés keletkezik Felsőszölnökön, az ország legnyugatibb településén. Figyelemre méltó, hogy a fertőzés (minimális aktivitást mutatva) igen sokára jutott ki a településről. Miután azonban a 30. és 40. nap között feljutott Budapestre, rövidesen megkezdte exponenciális növekedését és hierarchikus diffúziós mintát mutató terjedését. A 80. nap végére a kiinduló településen hat fertőzött volt (ami még mindig csak a lakónépesség egy százaléka), míg Budapesten 101. Míg a fertőzés a 80. napra már a távoli regionális központokban is terjedt, addig a kiinduló településsel szomszédos falvak jóformán érintetlenek maradtak.

Az A forgatókönyvek a külső forrásból származó fertőzötteket véletlenszerűen osztották szét az országban, nem súlyozva sem terület, sem aktivitási csoport szerint. Az 5. ábrán látszik, hogy a frissen fertőzöttek aránya éppen ezért kezdetben az aktivitási csoportok lakónépességén belüli megoszlását tükrözi, egyes kis lélekszámú kategóriákat (pl. egyetemisták) alig érintve. Látható azonban az is, hogy fokozatos átrendeződés következik be: a fertőzés „rátalál” azokra, akik nagyobb arányban kitéttek a fertőzésveszélynek, és nagyobb arányban adják is át az aktivitáscsoportjukon belül. Ennek köszönhető az egyetemisták és ingázók

5. ábra: A frissen fertőzött emberek (<5 nap) számának alakulása az 1A forgatókönyv ($R_0=2,66$; korlátok nélküli terjedés) futtatása alapján

The distribution of recently infected people (less than 5 days) by activity group according to the 1A scenario ($R_0=2.66$; no restrictions implemented)



Forrás: a szerző szerkesztése

látványos előretörése. A véletlenszerűen elosztott kiindulópontok hatása miatt a fertőzés az időszak során fokozatosan közelítette a paramétereiből következő $R_0=2,66$ -ot, gyorsulva, ahogy rátalált „ideális terjesztőire”. Ez rámutat arra, hogy a korlátozások időbeli eredményességén túl, célzottságuk is igen komoly befolyással lehet az eredményességükre.

A különböző futtatások megerősítik, hogy a korlátozások akkor érvényesülnek a leghatékonyabban, ha a fertőzés kezdete és a korlátozások időbeli bevezetése között minél kevesebb idő telik el (5. táblázat). A 2A forgatókönyv esetében igen csekély volt az a szakasz, amikor a vírus korlátozások nélkül tudott terjedni (az első, egyetemistákat célzó korlátozások március 12-én léptek életbe). Így a mérséklő hatás még az igazán drasztikus exponenciális felfutás előtt életbe tudott lépni. A 3. forgatókönyv esetében egy héttel korábban kezdett futtatás 35 főnyi plusz külső fertőzést, valamint egy héttel később bevezetett korlátozásokat jelentett. Mégis ennek eredményeként április 20-ára duplájára nőtt a modellezett

5. táblázat: Összes megfertőződött száma az egyes forgatókönyvek szerint április 20-án, valamint a regisztrált esetek száma

The number of infected people on the 20th of April according to different scenarios, compared to the number of registered infections

Forgatókönyv	2A	3A	4A	6A	7A	Regisztrált esetek száma
Összes megfertőződött száma	671	1 324	4 531	1 003	2 490	1 984
Eltelt napok száma a modellfut-tatás kezdete óta	56	63	92	56	63	

Forrás: a koronavirus.gov.hu, saját számítások

megfertőzött lakosság száma. Az eredményekből látható, hogy a korlátozások elsősorban a hierarchikus diffúziót gátolták meg.

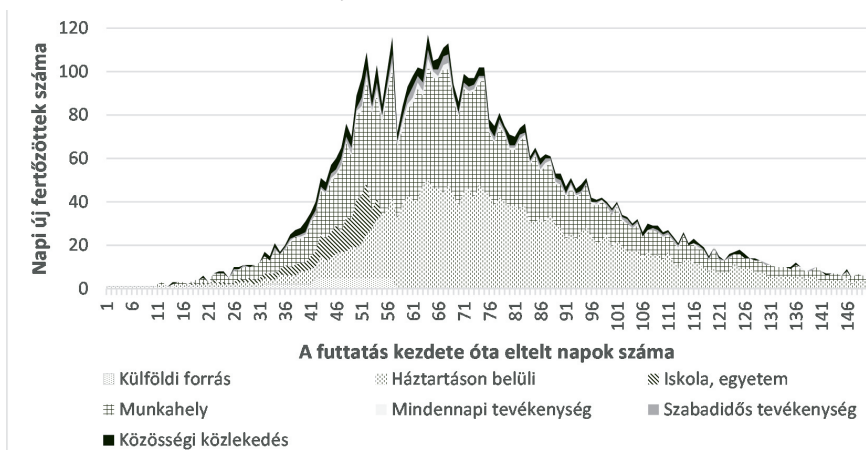
A 4A forgatókönyv összességében kevesebb külső forrásból származó fertőzéssel számol a 3A forgatókönyvnél, azonban időben jóval elnyújtottabb megjelenéssel. Az összes megfertőződés számában megjelenő különbség drasztikus: míg az első korlátozó intézkedések bevezetésekor a 3A forgatókönyv esetében az összes megfertőződött száma 352, addig a 4A forgatókönyv esetében több mint 1 200. Így itt jobban tud érvényesülni a korlátozások nélküli forgatókönyvek esetében bemutatott jelenség: a hosszabb belső forrásból származó növekedés lehetővé teszi, hogy a fertőzés „rátaláljon” azokra a társadalmi csoportokra, amelyek hatékonyan terjesztik.

A 2. ábrához hasonlóan itt is érdemes megvizsgálni, időben hogyan változott az új fertőzések források szerinti megoszlása (6. ábra). Látható, hogy a vártnak megfelelően először az iskolai, egyetemi kapcsolatok útján történő terjedés tűnt el teljesen (4. táblázat), majd a munkahelyeket érintő egyre szigorúbb korlátozások, az átállás az otthoni munkavégzésre, illetve a sajnálatos kényszerszünetek és leépítések a munkahelyi fertőzésátadás mértékét is nagyban csökkentették. Az egyéb csatornák beszűkülése viszont oda vezetett, hogy a háztartásokon belüli fertőzésátadás jelentősége relatíve megnőtt.

A 4. táblázatból látható az is, hogy a magasabb alap reprodukciós rátát használó ($R_0=3,25$) 6A és 7A forgatókönyvek a 2A-hoz és 3A-hoz viszonyítva számottevően magasabb fertőzésszámot modelleztek április 20-ára. Ez elsősorban a gyorsabb feljutásnak volt köszönhető, mert a kapott eredmények alapján a korlátozások alkalmasak voltak arra, hogy az alacsonyabb mellett a magasabb repro-

6. ábra: A napi új fertőzések megoszlása a fertőzés forrása szerint az 4A forgatókönyv ($R_0=2,66$; január 20-ai kezdetű terjedés) futtatása alapján

The distribution of new infections by social contact type according to the 4A scenario ($R_0=2.66$; onset of January 20th)



Forrás: a szerző szerkesztése

dukciós értékű forgatókönyvekben is megakasszák a fertőzés gyorsuló ütemű terjedését. Az alacsonyabb kiindulási reprodukciójú forgatókönyvek esetében az összes korlátozás érvénybe léptetése után az effektív reprodukciós érték 0,75 körülre süllyedt, míg a magasabb reprodukciós értéket tartalmazó változatoknál 0,8-0,9 körül ingadozott. Ez összhangban van a napi új regisztrált fertőzöttek számának április során megtorpant növekedésével.

Következtetések

A korlátozásokat tartalmazó forgatókönyvek esetében az új fertőzések száma április elején tetőzött, de a fertőzőképes emberek száma a korlátozások ellenére is csak lassan csökkent. Az eredmények alapján valószínűsíthető, hogy a háztartáson belüli fertőzések jelentős szerepet játszanak a járvány levonulásának időbeli kitolódásában. Az átlagos magyar háztartások korlátozott védekezési lehetőségeit (pl. fertőzészgyanús családtag elszigetelése) figyelembe véve, a háztartáson belüli fertőzésátadás valószínűsége a többi társas érintkezési formához képest a korlátozások után is magas marad. Így bár az egyéb társadalmi érintkezésekhez kapcsolatos fertőzésátadási csatornák leszűkültek, a kevés ilyen módon létrejött fertőzés nagy valószínűséggel korábban nem érintett háztartásba jut, ahol aztán a korlátozásokat megelőző időszakhoz hasonló valószínűséggel terjed a családtagok között. Ezzel egyrészt meghosszabbítja a fertőzés élettartamát még akkor is, ha utána a fertőzés nem jut ki az adott háztartásból. Másrészt viszont megteremti a lehetőséget annak, hogy egy olyan háztartástagot fertőz meg, aki aztán relatíve magasabb aktivitása miatt képes azt továbbadni (munkavállaló aktivitási csoportok). Így azt lehet mondhatni, hogy az erősen korlátozott terjedési csatornák teremtette körülmények között a háztartástagok multiplikátor hatással bírnak a fertőzésre.

Pozitív fejlemény azonban, hogy bár a korlátozások bevezetése után előtérbe kerültek bizonyos aktivitási csoportok az újonnan fertőzöttek között (elsősorban az ingázók), az eredmények alapján szerencsére nem találtam bizonyítékot arra, hogy lenne olyan társadalmi csoport, amire nézve a korlátozások után is fennmaradt volna az exponenciális terjedés trendje.

A nemzetközi tapasztalatok (Li, R. et al. 2020; Streeck et al. 2020), mértékadó hazai szakemberek, köztük Ferenci Tamás klinikai biostatistikus véleménye (index.hu 2020), valamint a H-UNCOVER felmérés eredményei (ksh.hu 2020) is egyöntetűen arra mutatnak, hogy az első hullámban megfertőződtek valós száma akár többszörösen is meghaladhatta a hivatalosan regisztrált fertőzöttekét. Ebből kiindulva a 2-es, 3-as és 6-os forgatókönyvek esetében valószínűsíthetjük, hogy a megalkotásukhoz tett feltételezések nem írják le kellően jó közelítéssel a valós eseményeket (5. táblázat). Az ígéretesebbnek ítélt 4A (január 20-ai kezdetű terjedés, $R_0=2,66$) és 7A (február 18-ai kezdetű terjedés, $R_0=3,25$) forgatókönyve-

ket korrelációanalízis segítségével részletesebb elemzésnek vettem alá, összevetve a modellezett összes megfertőződötték számának alakulását a regisztrált megfertőződötték számának alakulásával (március 4. – május 11. közötti időszak), valamint a modellezett napi új fertőzötték számát a napi új, nem intézményi regisztrált fertőzések számának alakulásával (március 14. – április 20. közti időszak). Figyelembe véve, hogy a fertőzés bekövetkezte és a fertőzés statisztikai nyilvántartásba kerülése (regisztrált fertőzötté válás) között számottevő idő telik el, és így a friss statisztikák egy korábbi időpillanat fertőzöttségét tükrözik, a hivatalos adatok két héttel előretolt változatát is összevettem a modellezett eredményekkel. Végül az egyedi események hatásának tompítása érdekében az új fertőzések két (modellezett és regisztrált) adatsorának mozgóátlagát is összevettem egymással (6. táblázat).

A 6. táblázat alapján összes megfertőződött modellezett értékének korrelációja a regisztrált esetek számával kimagasló (0,9 fölötti). Ennek jelentőségét árnyalja azonban, hogy két monoton növekvő adatsor esetén jó együttmozgás a két mutató közötti kapcsolat fennállása nélkül is létrejöhet. Amikor azonban figyelembe vettem a megfertőződés és regisztrációba vétel közötti időbeli eltolódást, és a regisztrált esetek adatsorát két héttel előretoltam, az tovább növelte a korrelációs kapcsolat erősségét (0,98 és 0,995). Ez megerősíti annak valószínűségét, hogy a modellfuttatások és a végbement események között valódi kapcsolat áll fenn.

Megvizsgáltam továbbá az adott napon regisztrált nem intézeti (kórházon, idősok otthonán kívüli) fertőzötték és modellezett megfertőzések közötti korrelációs kapcsolatot is. Az 5. táblázatból látható, hogy a két adatsor között alapesetben nincs számottevő együttmozgás, és a vizsgálat szignifikanciaszintje sem elégséges. Azonban a megfertőződés időpontja és a regisztrációba vétel közötti időbeli késleltetés ellensúlyozása itt is látványos javulást hozott az együttthatók-

6. táblázat: Korrelációs együttthatók a hivatalos adatsorok, valamint a 4A forgatókönyv és a 7A forgatókönyv eredményei között
Correlation coefficients between the official data and the 4A and 7A scenarios

Korrelációanalízisbe bevont mutatók	4A		7A	
	Együtth.	Sig. (p)	Együtth.	Sig. (p)
Regisztrált esetek száma (03.04 – 05.11.)	0,919*	0,000	0,964*	0,000
Regisztrált esetek száma (03.04 – 05.11, két héttel előretolva)	0,978*	0,000	0,995*	0,000
Napi új (nem intézeti) fertőzötték száma (03.04 – 04.20)	-0,059	0,726	0,306	0,062
Napi új (nem intézeti) fertőzötték száma (03.04 – 04.20, két héttel előretolva)	0,610*	0,000	0,538*	0,000
Napi új (nem intézeti) fertőzötték száma (03.04 – 04.20, két héttel előretolva, mozgóátlagok)	0,797*	0,000	0,654*	0,000

*Az eredmény 99%-os valószínűségi szint mellett szignifikáns ($p < 0,01$)

Forrás: a koronavirus.gov.hu, atlo.team/koronamonitor, Innovációs és Technológiai Minisztérium 2020 alapján saját számítás

ban. Ha pedig emellett az adatsorok öt napos mozgóátlagára végezzük el a vizsgálatot, akkor a 4A forgatókönyv esetében már kifejezetten erős, de a 7A forgatókönyv esetében is közepesen erős az együttmozgás.

Érdemes összevetni a modellezett értékeket a május 1. – május 16. között végzett, országosan reprezentatív H-UNCOVER felmérés eredményeivel is (ksh.hu 2020). Ennek alapján a fertőzésen átesettek száma május első felében 56 000 fő körülire, az aktív fertőzöttek száma pedig 2 500 fő körülire tehető. Ez lényegesen magasabb a regisztrált fertőzöttek akkori számánál, és a modellezett eredményeknél is (a 4A forgatókönyv szerint május 10-én az összes fertőzés által érintett lakos száma 5 238 fő volt). Ha elfogadjuk, hogy az alap reprodukciós értékre vonatkozó becslések hozzávetőlegesen helyesek, valamint hogy a március közepétől fokozatosan érvénybe lépő korlátozások érdemben leszorították a reprodukciós értéket, ez a magas érték szintén az első hivatalosan regisztrált fertőzéseket lényegesen megelőző fertőzéskezdetet valószínűsíti. Összességében tehát a fentiek alapján a modellezett forgatókönyvek közül a 4A forgatókönyv feltételezései (igen korai, akár januári kezdetű terjedés, $R_0=2,66$ -os reprodukciós érték) állhatnak a legközelebb a valósághoz.

Végezetül fontos említést tenni arról, hogy ez a következtetés nem egyezik a kézirat benyújtása idején frissen nyilvánosságra hozott hazai vírusgenomikai kutatás eredményeivel (huncovgen.brc.hu 2020). E kutatás a SARS-CoV-2 vírus genetikai anyagát és az abban bekövetkező mutációkat vizsgálva, a hazai mintákat a nemzetközi adatbázissal összevetve leszármazási vonalakat térképez fel, amelyből a terjedésre vonatkozó információkat nyer ki. Legfontosabb – kutatást érintő konklúziói:

- az első hullámot okozó Magyarországra történő behurcolások jellemzően február végén és március első felében történtek, az esetleges korábbi behurcolások szigetszerűek maradtak;
- az első járványhullám behurcolásból kiinduló fertőzészáncai lokálisak maradtak;
- a sikeres védekezés következtében a tavaszi fertőzészánkok megszakadtak, a második hullám a nyár közepi újbóli behurcolások révén alakult ki.

Természetesen ennek fényében lehetséges, hogy vizsgálatom valamely ismeretlen hiányossága vagy ismert egyszerűsítése téves eredményekhez vezetett. A lehetséges hiányosságok közé tartozhat például a február végi – március eleji külföldi behurcolások számának drasztikus alábecslése. Egyik elismert egyszerűsítés a kiinduló fertőzők aktivitási csoporttól független elosztása a társadalmon belül. Valószínűsíthető azonban (abból kiindulva, hogy a kezdeti külföldi fertőzőcsoportok elsősorban síparadicsomok voltak), hogy a kezdeti fertőzők között felülreprezentáltak voltak a magasabb szociális aktivitású csoportok. Ezen egyszerűsítés végeredményre gyakorolt hatása akkor válik számottevővé, ha a behurcolt fertőzések számát jelentősen alábecsültem (a 4A forgatókönyv esetén például csekély).

Kellő háttér-információ (pl. a minta reprezentativitása) és kellő szakértelem nélkül az említett vírusgenomikai kutatás eredményeinek helyességét nem tudom megítélni. Viszont jelenlegi ismereteim alapján annyit meg merek kockáztatni, hogy a felvázolt három következtetés nem csak az én kutatásommal, hanem a H-UNCOVER kutatás eredményeivel is nehezen feloldható ellentmondásban áll. Mindez arra mutat rá, hogy minden kutatási eredményt, így a tanulmányomban leírtakat is érdemes fenntartásokkal kezelni, azokat más területek, módszertanok eredményeivel összevetve értékelni.

Záró gondolatok

A kutatás bemutatott eredményei visszaigazolták, hogy a választott ágens alapú módszertan alkalmas eszköz a COVID-19 fertőzés első hullámának modellezésére, releváns eredményeket tud szolgáltatni. A létrehozott 12 forgatókönyv lehetővé tette a területi terjedés és a korlátozások hatásának sokoldalú modellezését. A korlátozás nélküli futtatásban a vártnak megfelelően a vírus terjedési üteme exponenciális, hatnaponkénti duplázódással. Ez egyrészt egybecseng a nemzetközi szakirodalmi tapasztalatokkal, másrészt visszaigazolja a modell működésének helyességét. A korlátozások nélküli forgatókönyvekben a munkahelyi társas érintkezések bizonyultak a legfontosabb terjesztő csatornának, ezt követte az iskolai, illetve a háztartáson belüli fertőzésátadás. A korlátozások nélküli forgatókönyvben a létrehozott aktivitási csoportok közül az ingázók, illetve az egyetemisták voltak leginkább kiteve a fertőzés veszélyének.

Az eltérő kezdőpontból induló forgatókönyvek elemzése alapján két jellegzetes területi terjedési mintázatot lehetett azonosítani: a hierarchikus diffúziót, ami esetében a vírus a településhierarchia csúcsán levő településektől haladt az alacsonyabbak felé, gyakran nagy földrajzi távolságot is áthidalva, valamint a vonzaskörzeten belüli, ingázási kapcsolatokon keresztüli terjedést. Ennek megfelelően a kis lélekszámú, nagyvárosi központoktól távol eső vidéki települések maradnak legtovább érintetlenek a fertőzéstől.

Érdekes tapasztalat, hogy a fertőzés koncentrálódást mutat véletlenszerű kezdőpontokból indított futtatás esetén is – ez a településhierarchia magas szintjén álló városok jelentőségtöbbletének következménye. A koncentrálódásnak azonban megvannak a határai – a 40. napon, még a budapesti kiindulópontú futtatás esetén is a megfertőződöttek többsége már a fővároson kívülről került ki. Ez némileg ellentmond az első hullám regisztrált fertőzöttjeinek lakóhelyre vonatkozó adataival, és felveti annak a lehetőségét, hogy a budapesti lakosok felülreprezentáltak voltak a felderített fertőzöttek között (azaz a fővároson kívüli fertőzések nagyobb arányban maradnak felderítetlenek). Ugyanakkor ez az eredmény gyakorlati megfontolásokkal is szolgál: ha egy városi gócpontban tömeges megbetegedéseket regisztrálnak, akkor nagy a valószínűsége, hogy a fer-

tőzés ekkorra már kijutott a településről a hierarchikus diffúziós csatornákon keresztül.

A korlátozásokat tartalmazó forgatókönyvek elemzése szintén fontos tapasztalatokkal szolgált, és gyarapította azon eredmények sorát, amelyek rámutatnak arra, hogy a korlátozások akár csak egy hetes késleltetése is milyen drasztikus különbségeket tud okozni az összfertőzésszámban. A kapott eredmények alapján a korlátozások elsősorban a hierarchikus diffúziós mintát követő terjedést akadályozzák. Továbbá a terjedési csatornák is átrendeződnek: az egyéb módzatok bezárultával, illetve beszűkülésével megnő a háztartáson belüli fertőzésátadás szerepe. Vélhetően a háztartáson belüli, jóval nehezebben megelőzhető fertőzésátadás okozta multiplikátor-hatás jelentősen lassítja a járvány lecsengését.

Összevetve a kapott eredményeket a regisztrált fertőzöttek számával és a H-UNCOVER felmérés eredményeivel, az egyes forgatókönyvek valószínűségét eltérően ítélt meg. Az összevetés alapján a valós eseményeket vélhetően a 4A forgatókönyv közelíti meg legjobban, ami a legszélesebb körben elfogadott, alacsonyabb alap reprodukciós rátát tartalmazza, viszont a hivatalosan regisztrált fertőzéseknél sokkal korábbi (akár januári) fertőzéskezdetet feltételez. Ahogy a forgatókönyvek bemutatásánál írtam, ennek alátámasztására szilárd bizonyítékokat jelen ismereteim szerint nem lehet felsorakoztatni. Ezen modellfuttatások sem tekinthetők e kérdésben bizonyító erejűnek, ugyanakkor egy újabb érvet szolgáltatnak amellett, hogy nem is érdemes teljességgel kizárni a lehetőséget.

A különböző futtatások eredményei azt mutatják, hogy a korlátozások bevezetésével az effektív reprodukciós értéket minden társadalmi csoport esetében sikerült 1 alá szorítani. Mivel azonban semmilyen más körülmény nem változott, sajnos várható volt, hogy a hatósági korlátozások enyhítése, valamint a lakosság lazuló fegyelme az óvintézkedések és ajánlások betartásában egy ponton túl az effektív reprodukciós érték egy fölé emelkedéséhez és az új fertőzések számának ismételt gyorsuló növekedéséhez fog vezetni (ahogy az a többi európai országban szintén elkerülhetetlennek bizonyult).

Ahogy a bevezetőben írtam, e tanulmány alapját adó kutatás még 2020. március-áprilisában készült, amikor egy ország figyelte aggódva a napi adatokat: vajon a szigorú intézkedések elegendőnek bizonyulnak-e eme újonnan feltűnt fenyegetés leküzdésére. E tanulmány lektorálásra benyújtott változatát már a második hullám derekán írtam. Ekkor abbéli bizakodásomat fejeztem ki, hogy az ismételt bevezetett szigorú korlátozások ez alkalommal is célt érnek, és a révbé érő vakcinafejlesztések a növekvő természetes immunitással karöltve, rövidesen limitálják a SARS-CoV-2 vírus terjedésének lehetőségeit. 2021 júniusában, a kézirat csiszolásának befejezésekor ez utóbbi reményem beteljesülni látszik. Egy ország tragédiája azonban, hogy előbb túl kellett esnünk egy korábbinál is több áldozatot követelő harmadik hullámon. A jövő ráadásul továbbra is bizonytalan: a vakcináció itthoni üteme lassul, ráadásul joggal tarthatunk a vírus újabb, fertőzőképesebb és/vagy ellenállóbb változatainak megjelenésétől, behurcolásától. Éppen ezért a történések

naprakész figyelése, valamint a korábbi események minél több szempontból és módszertannal történő elemzése, a különböző eredmények összevetése továbbra is kulcsfontosságú marad ahhoz, hogy meg tudjuk tartani a lépéselőnyünket eme mikroszkopikus ellenséggel szembeni küzdelemben.

Jegyzet

- 1 A modellezéshez felhasznált program, valamint a kapcsolódó eredménytáblák és további ábrák elérhetőek a MendeleyData oldalán tárolva, az alábbi linken: <http://dx.doi.org/10.17632/p9m86b2mhs.1>

Köszönetnyilvánítás

A Magyarország XXI. századi társadalmi-gazdasági térfolyamatainak komplex modellezési lehetőségei PD 128372 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a PD_18 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom

- Bereczki D., Stang R., Böjti P., Kovács T. (2020): A SARS-CoV-2 koronavírus által okozott COVID-19-járvány neurológiai vonatkozásai. *Ideggyógyászati Szemle*, 5-6., 171–175. <https://doi.org/10.18071/isz.73.0171>
- Bessenyei I. (2020): A főáramú közgazdaságtan előrejelzése a koronavírus járvány várható következményeiről. *Tudásmenedzsment*, 1., 181–185.
- Billari, F. C., Fent, T., Prskawetz, A., Scheffran, J. (2006): *Agent-Based Computational Modelling*. Physica-Verlag, Heidelberg
- Buitrago-Garcia, D., Egli-Gany, D., Counotte, M. J., Hossmann, S., Imeri, H., Ipekci, A. Z., Salanti, G., Low, N. (2020): Occurrence and transmission potential of asymptomatic and presymptomatic SARS-CoV-2 infections: A living systematic review and meta-analysis. *PLOS Medicine*, 9., e1003346. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003346>
- Bukodi, E. (1999): Educational choices in Hungary. *Hungarian Statistical Review*, 71–94.
- CDC COVID-19 Response Team (2020): Severe Outcomes Among Patients with Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) — United States, February 12–March 16, 2020. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 12., 343–346. <http://dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6912e2>
- Cevik, M., Tate, M., Lloyd, O., Maraolo, A. E., Schafers, J., Ho, A. (2021): SARS-CoV-2, SARS-CoV, and MERS-CoV viral load dynamics, duration of viral shedding, and infectiousness: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Microbe*, 2., 13–22. [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(20\)30172-5](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(20)30172-5)
- Cruz, A. T., Zeichner, S. L. (2020): COVID-19 in Children: Initial Characterization of the Pediatric Disease. *Pediatrics*, 6., e20200834. <https://doi.org/10.1542/peds.2020-0834>
- Csikász-Nagy A., Pongor S. (2021): Ezek életét menthetik meg a lezárások - A koronavírus modellezése egy virtuális városban. <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20210111/ezrek-eletet-menthetik-meg-a-lezarasok-a-koronavirus-modellezese-egy-virtualis-varosban-464590>. (Megjelenés időpontja: 2021. 01. 11.; Letöltés: 2021. 01. 11.)

- Dawid, H., Harting, P., van der Hoog, S., Neugart, M. (2019): Macroeconomics with Heterogeneous Agent Models: Fostering Transparency, Reproducibility and Replication. *Journal of Evolutionary Economics*, 29., 467–538. <https://doi.org/10.1007/s00191-018-0594-0>
- Deslandes, A., Berti, V., Tandjaoui-Lambotte, Y., Alloui, C., Carbonnelle, E., Zahar, J. R., Briclher, S., Cohen, Y. (2020): SARS-CoV-2 was already spreading in France in late December 2019. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 6., 106006. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.106006>
- Dong, Y., Mo, X., Hu, Y., Qi, X., Jiang, F., Jiang, Z., Tong, S. (2020): Epidemiology of COVID-19 Among Children in China. *Pediatrics*, 6., e20200702 <https://doi.org/10.1542/peds.2020-0702>
- Du, Z., Xu, X., Wu, Y., Wang, L., Cowling, B. J., Meyers, L. (2020): Serial Interval of COVID-19 among Publicly Reported Confirmed Cases. *Emerging Infectious Diseases*, 6., 1341–1343. <https://dx.doi.org/10.3201/eid2606.200357>
- Dusek, T. (2003): A gravitációs modell és a gravitációs törvény összehasonlítása. *Tér és Társadalom*, 1., 41–58. <https://doi.org/10.17649/TET.17.1.873>
- Fagiolo, G., Roventini, A. (2017): Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models Redux: New Developments and Challenges Ahead. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 1., <https://doi.org/10.18564/jasss.3280>
- Fehérvári A., Szemerszki M. (2019): Tanulási utak a közoktatásban és a felsőoktatásban. *Educatio*, 4., 645–658. <https://doi.org/10.1556/2063.28.2019.4.1>
- Gorochowski, T. E. (2016): Agent-based modelling in synthetic biology. *Essays in biochemistry*, 4., 325–336. <https://doi.org/10.1042/EBC20160037>
- Grow, A., Bavel, J. V. (2017): *Agent-Based Modelling in Population Studies*. Springer, Cham <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32283-4>
- Hámori Á., Horváth Á. (2018): A felsőoktatás szociális dimenziója Magyarországon. *EUROSTUDENT VI. gyorsjelentés*. Oktatási Hivatal, Budapest
- Han, Q., Lin, Q., Jin, S., You, L. (2020): Coronavirus 2019-nCoV: A brief perspective from the front line. *Journal of Infection*, 4., 373–377. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.02.010>
- Hermann Z. (2003): *Továbbtanulási döntés az általános iskola végén: a kulturális és a jövedelmi tényezők szerepe. PhD-értekezés*. Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem, Budapest
- Heshmati, A., Lenz-Cesar, F. (2013): Agent-Based Simulation of Cooperative Innovation in R&D. *Research Evaluation*, 1., 15–29. <https://doi.org/10.1093/reseval/rvs032>
- Jing, Q. L., Liu, M. J., Zhang, Z. B., Fang, L. Q., Yuan, J., Zhang, A. R., Dean, N. E., Luo, L., Ma, M. M., Longini, I., Kenah, E., Lu, Y., Ma, Y., Jalali, N., Yang, Z. C., Yang, Y. (2020): Household secondary attack rate of COVID-19 and associated determinants in Guangzhou, China: a retrospective cohort study. *The Lancet Infectious diseases*, 10., 1141–1150. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30471-0](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30471-0)
- Innovációs és Technológiai Minisztérium (2020): A járvány matematikai és egyéb kutatások szerepe a koronavírus-szembeni védekezésben. Online tudományos konferencia, 2020 április 23. Budapest <https://www.youtube.com/watch?v=q7vnYyzm00g>
- Kiss J. P. (2020): A magyar koronavírus-térkép – és ami abból következik. https://hvg.hu/tudomany/20200408_magyar_koronavirus_terkep_jarvany_teruleti_eloszas_adatok (Megjelenés időpontja: 2020. 04. 08.; Letöltés: 2020. 04. 08.)
- Koo, J. R., Cook, A. R., Park, M., Sun, Y., Sun, H., Lim, J. T., Tam, C., Dickens, B. L. (2020): Interventions to mitigate early spread of SARS-CoV-2 in Singapore: a modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*, 6., 678–688. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30162-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30162-6)
- Koós B. (2020): A koronavírus-járvány társadalmi-területi aspektusai Magyarországon. *Tér és Társadalom*, 2., 171–177. <https://doi.org/10.17649/TET.34.2.3261>
- Kovács B., Takács K. (2003): Szimuláció a társadalomtudományokban. *Szociológiai Szemle*, 3., 27–49.
- Kovács L. (szerk.) (2020): *Globális kihívás – lokális válaszok. A koronavírus (Covid19) gazdasági és társadalmi összefüggései és kihívásai*. Savaria University Press, Szombathely
- Kovács S. Zs., Uzzoli A. (2020): A koronavírus-járvány jelenlegi és várható egészségkockázatainak területi különbségei Magyarországon. *Tér és Társadalom*, 2., 155–170. <https://doi.org/10.17649/TET.34.2.3265>

- Kovács S. Zs., Koós B., Uzzoli A., Páger B., Egyed I. (2020): Regional effects of the COVID-19 pandemic and policy responses in Hungary. *R-Economy*, 3. 208–221. <http://doi.org/10.15826/recon.2020.6.3.018>
- KSH (2020): *Táv munka és „home office”*. KSH, Budapest <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/munkerohelyz/tavmunka/index.html> (Letöltés: 2020. 04. 08.)
- Lai, C. C., Shih, T. P., Ko, W. C., Tang, H. J., Hsueh, P. R. (2020): Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and coronavirus disease-2019 (COVID-19): The epidemic and the challenges. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 3., 105924. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105924>
- Lakatos B., Gopcsa L., Gondos E., Riczu A., Várnai Z., Nagy É., Molnár E., Bekő G., Bobek I., Reményi P., Szlávik J., Sinkó J., Vályi-Nagy I. (2020): Citokinellenes terápia az új típusú koronavírus okozta megbetegedés (COVID-19) kezelésében – tocilizumab elsőként való alkalmazása egy hazai infektológiai osztályon. *Orvosi Hetilap*, 26., 1070-1077. <https://doi.org/10.1556/650.2020.31899>
- Lennert J. (2020): *A SARS-CoV-2 vírus magyarországi területi terjedésének forgatókönyvei – egy ágens alapú modellezési kísérlet*. KRTK RKI, Magyarország <http://hdl.handle.net/11155/2203>; http://www-docs.rkk.hu/rkkweb/Lennert_terjedes_model.pdf
- Li, H., Liu, S. M., Yu, X. H., Tang, S. H., Tang, C. K. (2020): Coronavirus disease 2019 (COVID-19): current status and future perspectives. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 5., 105951. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105951>
- Li, R., Pei, S., Chen, B., Song, Y., Zhang, T., Yang, W., Shaman, J. (2020): Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV-2). *Science*, 6490., 489–493. <https://doi.org/10.1126/science.abb3221>
- Liu, Y., Eggo, R. M., Kucharski, A. J. (2020): Secondary attack rate and superspreading events for SARS-CoV-2. *The Lancet*, 10227, e47. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30462-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30462-1)
- Liu, Y., Gayle, A. A., Wilder-Smith, A., Rocklöv, J. (2020): The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. *Journal of Travel Medicine*, 2., taaa021. <https://doi.org/10.1093/jtm/taaa021>
- Mizumoto, K., Kagaya, K., Zarebski, A., Chowell, G. (2020): Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. *Eurosurveillance*, 10., 2000180. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.10.2000180>
- Neulinger Á., Kenesei Zs. (2016): Vásárlási szokások a családi életciklusokban: a vasárnapi zárva tartás befolyása a családi vásárlásokra. *Corvinus Marketing Tanulmányok*, 1., 1–27.
- Neumann J. (1966): *Theory of Self-Reproducing Automata* (Edited and completed by Burks, A. W.). University of Illinois Press, Urbana, USA
- Polónyi I. (2014): Felsőoktatási továbbtanulás kistérségi összefüggései. *Iskolakultúra*, 5., 3–17.
- Rabovszky D. (2009): *Felmérés az általános iskolások közlekedésbiztonsági tudásáról*. Nemzeti Közlekedési Hatóság. <https://www.scribd.com/doc/56005739/Rabodora-Altisk-Kozlbizti-Tudasa-KUTATAS> (Letöltés: 2020. 04. 08.)
- Reguly, Z. I., Csercsik, D., Juhász, J., Tornai, K., Bujtár, Zs., Horváth, G., Keömlény-Horváth, B., Kós, T., Cserey, Gy., Iván, K., Pongor, S., Szederkényi, G., Röst, G., Csikász-Nagy, A. (2021): Microsimulation based quantitative analysis of COVID-19 management strategies. *medRxiv* 2021.06.20.21259214. <https://doi.org/10.1101/2021.06.20.21259214>
- Rempört, Á., Gerlei Zs., Cseprekál, O., Wagner, L., Földes, K., Marton, A., Patonai, A., Török, Sz., Haboub-Sandil, A., Varga, M., Doros, A., Smudla, A., Fazakas, J., Kóbori, L. (2020): Az új koronavírus (SARS-CoV-2) okozta fertőzésben szenvedő vese- és májátültetett betegek ellátásának speciális szempontjai. *Orvosi Hetilap*, 32., 1310–1321. <https://doi.org/10.1556/650.2020.31923>
- Rockett, R. J., Arnott, A., Lam, C., Sadsad, R., Timms, V., Gray, K. A., Eden, J. S., Chang, S., Gall, M., Draper, J., Sim, E. M., Bachmann, N. L., Carter, I., Basile, K., Byun, R., O’Sullivan, M. V., Chen, S. C-A., Maddocks, S., Sorrell, T. C., Dwyer, D. E., Holmes, E. C., Kok, J., Prokopenko, M., Sintchenko, V. (2020): Revealing COVID-19 transmission in Australia by SARS-CoV-2 genome sequencing and agent-based modeling. *Nature Medicine*, 9., 1398–1404. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1000-7>

- Röst, G., Bartha, F. A., Bogya, N., Boldog, P., Dénes, A., Ferenci, T., Horváth, K. J., Juhász, A., Nagy, C., Tekeli, T., Vizi, Z., Oroszi, B. (2020): Early Phase of the COVID-19 Outbreak in Hungary and Post-Lockdown Scenarios. *Viruses*, 7., 708. <https://doi.org/10.3390/v12070708>
- Sebestyén, T., Varga, A. (2019): Knowledge Networks in Regional Development: An Agent-Based Model and its Application. *Regional Studies*, 9., 1333–1343. <https://doi.org/10.1080/00343404.2019.1622663>
- Shamil, S., Farheen, F., Ibtehad, N., Khan, I. M., Rahman, M. S. (2020): An Agent Based Modeling of COVID-19: Validation, Analysis, and Recommendations. *medRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.07.05.20146977>
- Strecek, H., Hartmann, G., Exner, M., Schmid, M. (2020): Preliminary result and conclusions of the COVID-19 case cluster study (Gangelt Municipality). University Hospital Bonn https://www.land.nrw/sites/default/files/asset/document/zwischenenergebnis_covid19_case_study_gangelt_en.pdf. (Letöltés: 2021. 05 12.)
- Szabó F. J. (2020): A COVID-19 járvány időbeli alakulásának vizsgálata szigmoid görbéekkel. *Multidiszciplináris Tanulmányok*, 3., 294–306. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.3.35>
- Tao, Y., Cheng, P., Chen, W., Wan, P., Chen, Y., Yuan, G., Chen, J., Huo, D., Guan, G., Sun, D., Tan, J., Yang, G., Zeng, W., Zhu C. (2020): High incidence of asymptomatic SARS-CoV-2 infection, Chongqing, China. *medRxiv* <https://doi.org/10.1101/2020.03.16.20037259>
- Tesfatsion, L. (2006): Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory. In: Tesfatsion, L., Judd, K. L. (eds.): *Handbook of Computational Economics, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics*. North-Holland, Amsterdam, 831–880.
- Tillett, R. L., Sevinsky, J. R., Hartley, P. D., Kerwin, H., Crawford, N., Gorzalski, A., Laverdure, C., Verma, S. C., Rossetto, C. C., Jackson, D., Farrell, M. J., Hooser, S., Pandori, M. (2020): Genomic evidence for reinfection with SARS-CoV-2: a case study. *The Lancet Infectious Diseases*. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30764-7](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30764-7)
- Vág A. (2006): Multiágens modellek a társadalomtudományban. *Statistikai Szemle*, 1., 25–52.
- Varjú V., Farkas O., Farkas, J. Zs., Vér, C. (2020): Az egyéni munkacélú személygépkocsi-közlekedés COVID-19 járvány következtében történő változásának néhány környezeti aspektusa Budapestén. *Tér és Társadalom*, 2., 183–188. <https://doi.org/10.17649/TET.34.2.3266>
- Wang, Y., Liu, Y., Liu, L., Wang, X., Luo, N., Li, L. (2020): Clinical Outcomes in 55 Patients With Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Who Were Asymptomatic at Hospital Admission in Shenzhen, China. *The Journal of Infectious Diseases*, 11., 1770–177. <https://doi.org/10.1093/infdis/jiaa119>
- Wei, W.E., Li, Z., Chiew, C. J., Yong, S. E., Toh, M. P., Lee, V. J. (2020): Presymptomatic Transmission of SARS-CoV-2 in Singapore. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 14., 411–415. [dx.doi.org/10.15585/mmwr.mm6914e1](https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6914e1)
- Wölfel, R., Corman, V.M., Guggemos, W., Seilmaier, M., Zange, S., Müller, M. A., Niemeyer, D., Jones, T. C., Vollmar, P., Rothe, R., Hoelscher, M., Bleicker, T., Brünink, S., Schneider, J., Ehmman, R., Zwirgmaier, K., Drosten, C., Wendtner, C. (2020): Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature*, 465–469. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2196-x>
- Wu, J. T., Leung, K., Leung, G.M. (2020): Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *The Lancet*, 10225., 689–697. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30260-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30260-9)
- Yom-Tov, E., Johansson-Cox, I., Lampos, V., Hayward, A. C. (2015): Estimating the secondary attack rate and serial interval of influenza-like illnesses using social media. *Influenza and Other Respiratory Viruses*, 4., 191–199. <https://doi.org/10.1111/irv.12321>
- Zhao, S., Lin, Q., Ran, J., Musa, S. S., Yang, G., Wang, W., Lou, Y., Gao, D., Yang, L., He, D., Wang, M. H. (2020): Preliminary estimation of the basic reproduction number of novel coronavirus (2019-nCoV) in China, from 2019 to 2020: A data-driven analysis in the early phase of the outbreak. *International Journal of Infectious Diseases*, 92., 214–217. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.01.050>

Egyéb internetes források

- <https://atlo.team/koronamonitor/> (Letöltés: 2020. 05. 20.)
- <https://www.bbc.com/news/health-52589449> (Megjelenés időpontja: 2020. 05. 10. Letöltés: 2021. 05. 12.)
- <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/download-todays-data-geographic-distribution-covid-19-cases-worldwide> (Letöltés: 2020. 11. 27.)
- https://index.hu/techtud/2020/04/03/tizszer_annyi_magyar_fertozott_van_mint_a_nyilvantartasban/ (Megjelenés időpontja: 2020. 04.03.. Letöltés: 2020. 04. 08sorozat-also-heti-riportja (Megjelenés időpontja: 2020. 04. 08. Letöltés: 2020. 04. 08.)
- <https://hirado.hu/belfold/cikk/2020/03/05/infektologus-enyhe-tunetei-vannak-az-irani-diakoknak> (Megjelenés időpontja: 2020. 03. 05. Letöltés: 2021. 05. 12.)
- <http://huncovgen.brc.hu/> (Letöltés: 2020. 12. 04.)
- https://hvg.hu/itthon/20200507_katonai_vilagjatekok_vuhan_koronavirus (Megjelenés időpontja: 2020. 04. 08. Letöltés: 2020. 04. 08.)
- https://hvg.hu/gazdasag/20200408_mav_jarvany_vonat_koronavirus (Megjelenés időpontja: 2020. április 8. Letöltés: 2020. 04. 08.)
- <https://koronavirus.gov.hu/cikkek/az-operativ-torzs-akcioterve-2020-januar-31> (Megjelenés időpontja: 2020. 03. 01. Letöltés: 2021.05.12.)
- <https://koronavirus.gov.hu/> (Letöltés: 2020. 05. 20.)
- https://www.ksh.hu/huncover_reprezentativ_felmeres_eredmenyek (Letöltés: 2020. 08. 30.)
- <https://news.sky.com/story/coronavirus-outbreak-hospital-to-be-built-in-five-days-as-death-toll-rises-in-china-11916211> (Megjelenés időpontja: 2020. 01. 25. Letöltés: 2021. 05. 12.)
- <https://www.nytimes.com/interactive/2020/03/22/world/coronavirus-spread.html> (Megjelenés időpontja: 2020. 03. 22. Letöltés: 2021. 05.12.)
- <https://www.reuters.com/article/us-china-health-italy/coronavirus-outbreak-grows-in-northern-italy-16-cases-reported-in-one-day-idUSKBN20F0UI> (Megjelenés időpontja: 2020. 02. 21. Letöltés: 2021. 05. 12.)
- <https://trademagazin.hu/hu/comprehensive-survey-shopping-habits/> (Megjelenés időpontja: 2017. 09. 26. Letöltés: 2020. 04. 08.)
- <https://www.vox.com/2020/3/23/21190033/coronavirus-covid-19-deaths-by-age> (Megjelenés időpontja: 2020. 03. 23. Letöltés: 2020. 04. 08.)
- <http://wazestats.com/active.php?city=7> (Letöltés: 2020. 04. 08.)