

Változó éghajlat, változó környezet, változó kórokozók. Meddig tart a járványok kora?

Földvári Gábor¹, Garamszegi László Zsolt², Szathmáry Eörs^{1*}

¹Evolúciótudományi Intézet, ELKH Ökológiai Kutatóközpont, Budapest, Magyarország

²Ökológiai és Botanikai Intézet, ELKH Ökológiai Kutatóközpont, Vácrátót, Magyarország

Beérkezett: 2021. 05. 08.; Elfogadva: 2021. 06. 14.

Összefoglalás

Az eddigi összes világjárványt olyan zoonotikus kórokozók, vírusok vagy baktériumok okozták, amelyek könnyen tudnak emberről emberre is terjedni. Minden egyes felbukkanó fertőzés egészségügyi, társadalmi és gazdasági költségeket von maga után. Az országhatárok nem tudják hatékonyan korlátozni a betegségek terjedését. Az eddigi trendek alapján jóval több mint félmillióféle, zömmel teljesen ismeretlen vírus lehet képes embereket megfertőzni. Az ember által letarolt vagy urbanizált területeken olyan állatfajok lesznek dominánsok, amelyek kifejezetten jó kórokozó-fenntartók. A hangsúlyt mostantól kezdve a megelőzésére kell helyezni, melynek a feltételei végrehajtható tervek formájában adottak. A hatékony megelőzés költséges, de jóval olcsóbb, mint egy világjárvány gazdasági következményeit viselni.

Kulcsszavak: felbukkanó kórokozók, járvány, klímaváltozás, biodiverzitás csökkenés, biológiai invázió

Changing climate, changing environment, changing pathogens. How long will the era of pandemics last?

Gábor Földvári¹, László Zsolt Garamszegi², Eörs Szathmáry¹

¹Institute of Evolution, ELKH Centre for Ecological Research, Budapest, Hungary

²Institute of Ecology and Botany, ELKH Centre for Ecological Research, Vácrátót, Hungary

Summary

So far, all pandemics have been caused by zoonotic pathogens, viruses or bacteria that could easily spread from human to human. Emerging infectious diseases entail huge costs for the health system, as well as for society and economy in general. Experience tells us that national borders are insufficient to prohibit the spread of infectious diseases. Extrapolation from current trends suggests that the number of largely unknown virus species able to infect humans is well over half a million. Overall, we seem to lack knowledge about 90% of the pathogens of the world. A striking experience is that pathogens can jump hosts based on their standing genetic variation and phenotypic plasticity. Mutations tend to follow later and lead to evolutionary finetuning of the pathogenic lifecycle. Human activity has contributed a great deal to the current dangerous rise of emerging infectious diseases. Climate change induces migration, biological invasions, and a higher incidence of the encounter of species with potential pathogens. Invading species tend to disrupt local ecosystems, resulting in lower biodiversity and higher susceptibility to disease of the remaining endemic species as well as the agriculturally important, domestic plant and animal populations. Habitats devastated by human activity as well urban areas will be dominated by species (such as rodents) that can harbour several potential and actual pathogens. Urbanization is a major risk factor for several reasons, including the elevated temperature in cities that contributes to the increase in pathogen survival during winter and the high population density and consequential contact rate of the local human population. Globalization adds to the security hazard posed by pathogens. From now on, emphasis should be put on the prevention of pandemics, for which we have executable plans.

One such plan is the DAMA protocol (Document, Assess, Monitor, Act). We must document the occurrence of potential pathogens in candidate host species. Then we assess the threat level associated with identified potential pathogens, followed by a systematic monitoring of the most dangerous pathogens, looking for early signs of potential outbreaks. Action means advice by experts on possible preventive measures by experts and their evaluation and execution by decision makers. Similar ecological diagnostics seem possible for biological invasions in general. Efficient prevention is costly, but considerably less so than bearing the economic consequences of pandemics by (re-)emerging infectious diseases.

Keywords: emerging pathogens, pandemic, climate change, biodiversity loss, biological invasion

Bevezetés

Az e sorok írásakor tomboló SARS-CoV-2 (Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2) koronavírus-járvány érkezésére nem számított az emberiség. Hetek alatt körbeért a bolygónkon, alig egy év leforgása alatt megölt 3 millió embert és megfertőzött százmilliókat. Az anyagi kár nehezebben becsülhető, de dollárbilliókban mérhető (Dobson *et al.* 2020), és a járvány, illetve a megfékezésére hozott intézkedések miatt világszerte sokakat sújt a munkanélküliség és az elszegényedés. Megelőzhető lett volna ez a járvány? Lesznek még hasonló járványok a jövőben? Mindkét kérdésre határozott igen a válasz.

Az újonnan felbukkanó betegségek (EIDs: emerging infectious diseases) egymással szoros összefüggésbe hozzák az egészségvédelmet, az élelmiszer-biztonságot, a nemzetgazdaságot és a határvédelmet. Emiatt kijelenthetjük, hogy komoly fenyegetést jelentenek bolygónk minden országának nemzetbiztonságára nézve. A felbukkanó betegségek nem a távoli trópusi országok problémái, hanem kézzelfogható közelségben vannak hazánkban is. Olyan harcot kell vívunk, melyben a mai ember túlélése a tét, és jelenleg ebben a háborúban vesztesre állunk. Mindig van remény, azonban minden nap, amely cselekvés nélkül telik el, rontja az esélyeinket a túlélésre. Két okból mondhatjuk joggal, hogy az emberiség háborúban áll. Az első az, hogy a minket fenyegető kórokozók nem a kényelmünket, hanem az életben maradásunkat veszélyeztetik. A második pedig, hogy olyan típusú preventív intézkedések szükségesek, amelyeneket a hadseregek is alkalmaznak hazájuk védelmének érdekében.

A katonai vezetők jól tudják, hogy a nagy krízisek kis konfliktusokkal kezdődnek, és jellemzően nem kulturális vagy szocio-ökonomiai vákuumban alakulnak ki. Következésképpen mindent megtesznek egy olyan háborúra való felkészülésért, amelyet reményeik szerint sosem kell majd megvívni. Ehhez hasonlóan a NASA vagy az Európai Űrügynökség (ESA) mindent megtesz az olyan aszteroidák becsapódására való felkészülésért, amelyek reményeik szerint sosem fognak becsapódni. Annak az esélye, hogy egy adott aszteroida (pláne egy adott választási cikluson belül) becsapódjon a Földbe, elhanyagolható. A kutatók ugyanakkor tisztában vannak vele, hogy 100% annak a valószínűsége, hogy valamikor a jövőben egy, a Földünk egészét érintő pusztításra képes aszteroida

csapódik be. A globális pusztítás minimális esélye elegendő a kormányoknak arra, hogy jelentős összegeket fordítsanak az ilyen ritka események megelőzésére és a várható kár csökkentésére.

De akkor miért nem teszünk meg mindent, hogy felkészüljünk az újonnan felbukkanó betegségekre, amelyek megjelenési valószínűsége jelentősen nagyobb? Ha a felbukkanó kórokozók nemzetbiztonsági fenyegetést jelentenek, nagyon is fel kellene készülnünk minden eszközzel, hogy proaktív lépéseket tegyünk. Írásunkban arra teszünk kísérletet, hogy áttekintsük a kórokozók felbukkanásának és a járványok kitörésének háttérben lévő hajtóerőket, valamint hogy javaslatot tegyünk az előrejelzésüket és megelőzésüket szolgáló proaktív intézkedésekre.

A felbukkanó kórokozók jellemzően zoonotikusak és jellemzően alig ismerjük őket

Az újonnan megjelenő kórokozók egy közös tulajdonsága, hogy általában valamilyen gerinces állatról (jellemzően madárról vagy emlősről) kerül át emberre, azaz zoonózis. Az elmúlt öt évtizedben regisztrált, korábban nem ismert, emberben felbukkanó mintegy 400 kórokozó (vírusok, baktériumok, protozoonok, gombák) 70 százaléka állatról került át emberre (Jones *et al.* 2008). Közismert példák a Lyme-kór, az Ebola, a nyugat-nílusi vírus vagy a Zika-vírus. Az utóbbi évszázad összes világjárványát egytől egyig zoonotikus vírusok okozták, mégpedig olyanok, amelyek könnyen tudnak emberről emberre is terjedni. Ilyen a HIV, az influenza, a SARS-CoV-1, a MERS és a SARS-CoV-2. Ezek a kórokozók akkor terjednek közvetlenül vadon élő állatról vagy egy köztes, pl. háziállat hordozón keresztül emberre, azaz bukannak fel, amikor ezek valamilyen kontaktusba kerülnek egymással.

A fent említett pandémiát okozó példák viszonylag jól ismertek, mivel gyakran kerülnek a tudományos és közegészségügyi mellett a közérdeklődés homlokterébe is. Noha ezek járnak rendszerint a legtöbb emberi áldozattal, korántsem lehet eltekinteni attól a jelentős számú kórokozótól, amelyek folyamatos jelenlétükkel egyfajta parazitaterhelésként vannak jelen. Nem gondoljuk azt, hogy egyetlen szuperbaktérium leselkedik ránk odakint, amely az egész emberiséget egyszerre eltüntetheti majd

a Föld színéről. Ez az emberiség széles földrajzi elterjedtsége, és a kórokozók biológiája miatt sem valószínű. Sokkal inkább várható egymással párhuzamosan zajló, több kisebb, de biztos adagokban bekövetkező csapások sorozata. Minden egyes felbukkanó fertőzés egészségügyi, társadalmi és gazdasági költségeket von maga után. Ráadásul, még ha az immunrendszerünk vagy a gyógykezelés látszólag vissza is szorítja az új kórokozót, attól az még nem fog eltűnni az életünkben örökre: továbbra is jelen lesz „patogén szennyezésként”. A nyugat-nílusi vírus, amely nemrég ütötte fel a fejét hazánkban, halálos áldozatokat is szedve (Zana et al. 2020), már nem akut probléma többé Észak-Amerikában, de soha nem fog teljesen eltűnni, és ezért továbbra is okozhat a jövőben gondokat. Az ellene való védekezésre folyamatosan szükséges humán erőforrásokat és anyagi javakat fordítani. A koronavírusok mellett sok más vírus térnyerése is zajlik, ilyen például a Zika, amely egész biztosan nem a legutolsó és nem is a legsúlyosabb következményekkel járó betegség, ami az emberi populációban felüti a fejét. Ezek a kórokozók jól szemléltetik azt a hibás elképzelést, miszerint az országhatárok korlátozni tudják a betegségek terjedését. A felismerés, hogy a Zika-vírus nemcsak szúnyog csípésével, hanem szexuális úton is fertőzőképes (Apari et al. 2019), valamint a gyors észak-amerikai terjedése alapos leckét adott abból, hogy mennyire fontos, hogy globális szintű, részletes és pontos információ álljon rendelkezésre a felbukkanó fertőzések potenciális és valós veszélyeiről mind helyi, mind globális léptékben.

Mindezeknél is nagyobb probléma azonban, hogy a világon előforduló patogének mindösszesen 10%-áról van tudomásunk (Brooks–Hoberg–Boeger 2019). Így nem állíthatjuk, hogy ismerjük az ellenségünket, ez pedig sebezhetővé tesz minket. Még a zoonózisok és a világjárványok szempontjából kiemelt fontosságú madár- és emlősvírusokból is csak néhány ezret ismerünk. Ezek becsült diverzitása 1,7 millióra tehető, ami azt jelenti, hogy az eddigi trendek alapján jóval több mint félmillióféle, zömmel teljesen ismeretlen vírus lehet képes embereket megfertőzni (Carroll et al. 2018). Jelentős mértékben a bioszférával kapcsolatos tudatlanságunk vezetett minket a jelenlegi krízisbe: egyszerűen nem ismerjük eléggé a természetet. És „amiről nem tudunk, az nem fáj”, tartja a mondás. Az eddig fel nem fedezett patogének és az őket hordozó vektorok itt vannak az orrunk előtt, akár csak egy evolúciós taposóakna, és arra várnak, hogy új élőhelyeket vegyünk birtokba, és átrendezzük az ökoszisztémát. A bolygónkon élő szervezetek több mint 50%-a élősködő életmódot folytat valamilyen formában (Windsor 1998). Ellentmondásnak tűnhet, de a paraziták (és velük a kórokozók) a bioszféra közönséges és esszenciális elemeit képezik, és ennek ellenére veszélyt jelentenek mindennemű társadalmi és gazdasági tevékenységünkre.

Természetpusztítás és klímaváltozás: a fő rizikófaktorok

A fentiek ismeretében talán már nem annyira meglepő, hogy az egyik fő hajtóerő a kórokozók felbukkanásában maga az emberi tevékenység. Számos trópusi, nagy fajgazdagságú tájon vannak be természetes élőhelyeket óriási ütemben mezőgazdasági termelésbe (pl. pálmaolaj, cukornád, avokádó termesztése vagy szarvasmarhatenyésztés céljából). Szintén nagy beavatkozásokkal jár az elektronikai iparnak fontos ritka ásványi anyagok bányászata, vagy amikor a ruhaipar számára tenyésztenek vagy vadásznak állatokat a prémjükért. Ráadásul ezeket a jellemzően szegényebb országokban zajló természetpusztító folyamatokat elsősorban a világ gazdagabbik részének túlzó fogyasztási igénye indukálja. A természetes élőhelyek pusztítása azok feldarabolódásával és a biológiai sokféleség csökkenésével jár. Ennek pedig súlyos következményei vannak a kórokozók ökológiájára és evolúciójára nézve is. A monokultúrás termesztés helyein lényegesen kevesebb növényevő és ragadozó fog túlélni. Ahol pedig kicsi a fajszám, ott azok a fajok lesznek dominánsak, amelyek kifejezetten jó kórokozó-fenntartók (Gibb et al. 2020). Ez nem véletlen, azok az állatok a leginkább túlélőképesekek, amelyek szaporák, nagy sűrűségben és nagy területen tudnak jelen lenni, mint például a rágcsálók. Az úgynevezett gerinces rezervoárok, azaz bizonyos madarak és emlősök sokkal sűrűbben lesznek jelen, és nagyobb hányadát teszik ki az ottani teljes állatvilágnak. Ők pedig sokkal inkább képesek fenntartani a különböző vírusokat, baktériumokat és egyéb kórokozókat. Végeredményben a természetpusztítás hosszú távon elősegíti a kórokozókat fenntartó állatok elterjedését. Eltűnőben van tehát az a biodiverzitási puffer, ami meggátolná a kórokozók átadását az emberre.

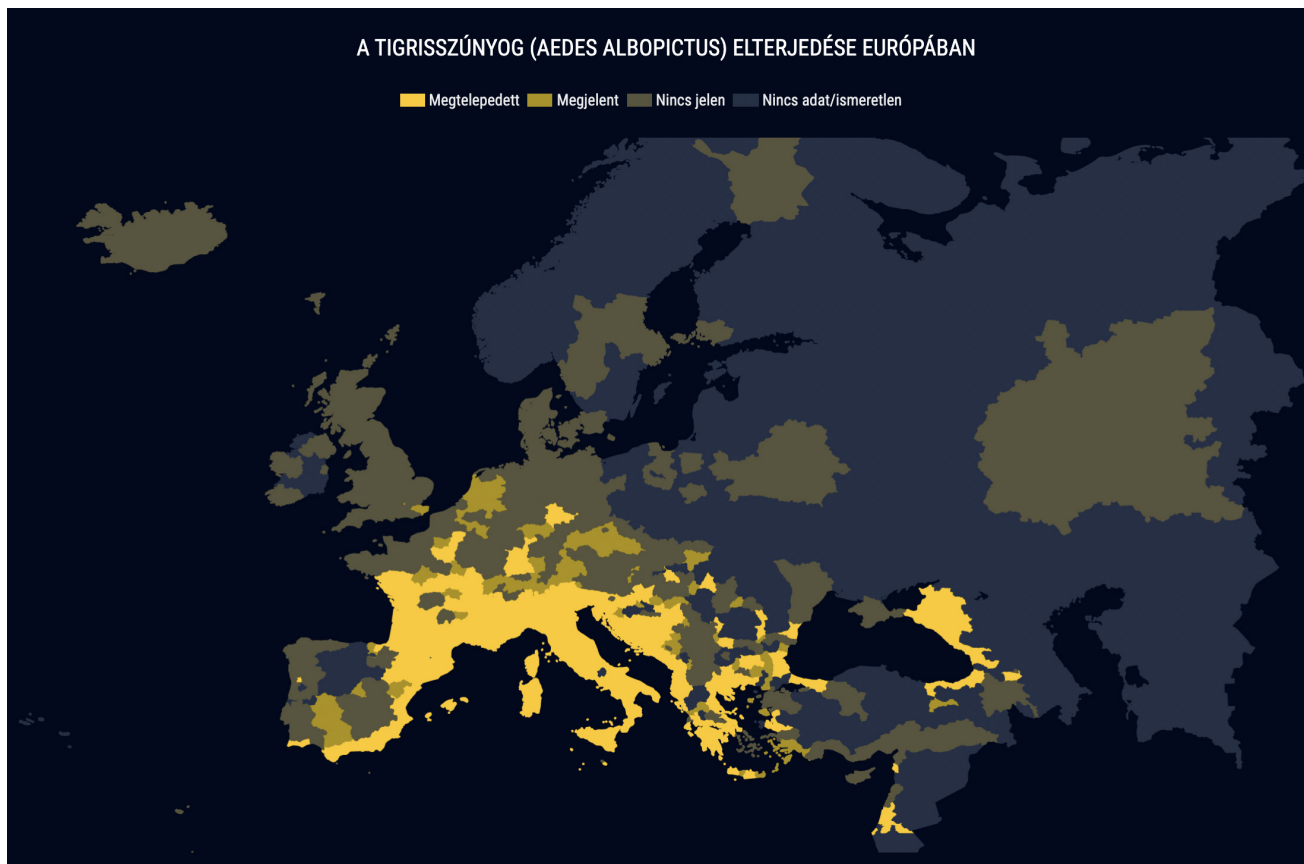
Emellett az ember természet felé történő terjeszkedése megnöveli a vadon élő állatok és az ember, valamint a vadon élő állatok és a háziállataink közötti kontaktusok számát, így a zoonotikus kórokozók terjedési esélyét is (Daszak et al. 2020). Hiszen a természetes élőhelyek beszűkülése tökéletes lehetőséget ad a kórokozóknak arra, hogy számukra alkalmas és legfőképpen addig nem ismert gazdaszervezetekkel kerüljenek kapcsolatba, amelyeknek ebből kifolyólag nincs idejük alkalmazkodni hozzájuk, és védelmet fejleszteni ellenük. Az olyan betegségek, amelyek 50 évvel ezelőtt ismeretlenek vagy jelentéktelenek voltak számunkra, mint a HIV, az Ebola, a nyugat-nílusi láz, a madárinfluenza vagy a Zika, mára mindennaposak. Néhány korábban is ismert betegség, mint a malária és a sárgaláz minden eddiginél súlyosabb csapást mértek ránk, míg mások, mint a pestis, ezekben a pillanatokban ütik fel ismét a fejüket az emberi populációkban. A mai világunkban ezek a folyamatok mindennaposak (I. ábra). A koronavírus világjárvány előtt is alig volt olyan hét, hogy a híradásokban ne bukkantak volna fel újonnan felfedezett kórokozók, amelyek embereket vagy éppen az európai sertéseket, a diótermésünket, a

paradicsomot, a növényeket beporzó rovarokat, vagy akár a tengeri uborkákat betegítik meg. A teljes ökoszisztéma és benne minden faj veszélynek van kitéve, hiszen azok számos szinten állnak összeköttetésben egymással, legyen szó szárazföldi, vagy akár tengeri életterekről. Ennél fogva az ember maga is veszélyben van, mivel ezen ökoszisztémákhoz erős társadalmi és gazdasági kapcsolat fűzi. Ezt a krízist az újonnan felbukkanó fertőző betegségek krízisének nevezzük, a kort, amelyben élünk, pedig a járványok korának.

Jelentős részben az emberi tevékenységnek köszönhető korunk másik legaggasztóbb globális folyamata, az éghajlatváltozás. A folyamatosan növekvő átlaghőmérséklet és a szélsőséges éghajlati események (pl. villámárvíz, aszály) háromféleképpen hathatnak az élő szervezetre: kipusztulnak, alkalmazkodnak vagy elvándorolnak. Utóbbi két esetben feltétlenül számítanunk kell a kórokozók új földrajzi régiókban és új gazdaszervezetekben való megjelenésére, hiszen a kórokozók, a vektoraik, vadon élő és házi rezervoár gazdáik, sőt az emberek is jelentős vándorlásokba kezdenek (Földvári–Szathmáry 2020). Ez új találkozási pontokat hoz létre, azaz növeli az új fertőző betegségek felbukkanásának esélyét. A közelmúltban kidolgozott Stockholm-paradigma (Brooks et

al. 2014) világossá teszi, hogy a kórokozók új helyen vagy új gazdában való felbukkanása a bioszféra beépített eszköztárát képezi, halkan ketyegő időzített bombaként. A korábbi elképzelésekkel ellentétben ugyanis nincs szükség genetikai változásokra ahhoz, hogy egy kórokozó új gazdában vagy új élőhelyen bukkanjon fel. Az ehhez szükséges teljes biológiai arzenálja (ún. fenotipikus plaszticitása) lehetővé teszi számára, hogy a változó körülmények esetén is túléljen (Brooks–Hoberg–Boeger 2019). A kórokozók tehát nemcsak abban jók, hogy megtaláljanak minket, de abban is, hogy észrevétlenül túléljenek az ún. rezervoár gazdáiban (Jones et al. 2008; Daszak et al. 2020; Gibb et al. 2020). Azok a patogének fogják a jövőben az új járványkitöréseket okozni, amelyek a legjobbak a túlélésben. Számos ilyen kórokozó várja, hogy „rá kerüljön a sor”. Arra várnak, hogy kihasználják a klímaváltozás, a fajok behurcolása, vagy akár az ember új helyen való megjelenése okozta megváltozott környezetet. Fel kell tehát készülnünk arra, hogy a kórokozók új helyeken és új gazdáiban (így emberben és háziállatban) való felbukkanása inkább szabályszerű és nem kivétel (Brooks et al. 2020).

A fenti folyamatok a bioszféra egészét érintik, így a kórokozók mellett a növény- és állatfajok földrajzi elter-



1. ábra

Az ázsiai tigrisszúnyog számos kórokozó terjesztéséért felelős, és egyre nagyobb területen telepszik meg Európában is

Forrás: <https://szunyogmonitor.hu/index.php/albopictus/> és <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/aedes-albopictus-current-known-distribution-september-2020>

jedésének drasztikus változása önmagában is számos egészségügyi, élelmiszerbiztonsági, gazdasági kockázatot rejt. Az ember által kiváltott gyors környezeti változások számos új ökológiai helyzetet teremtenek, így sok faj életfeltétele, elterjedése és az ökoszisztémákban betöltött funkcionális szerepe megváltozik. E környezeti hatások nagymértékben felgyorsítják a biológiai inváziót, mely során számos, földrajzilag távoli helyről származó, idegenhonos növény-, állat- és gombafaj, illetve alacsonyabb rendű szervezet (pl. vírusok, baktériumok) új területekre sodródik (vagy maga az ember hurcolja és telepíti be), ott túlél és szaporodik, és ezáltal nagy területeken alkot stabilis populációkat. Az inváziós fajok sikere azonban legtöbbször az őshonos flóra és fauna kárára valósul meg, mert az új fajok megjelenésével az eredeti közösségek tagjainak ökológiai kapcsolatrendszere átrendeződik, és e változások következtében a természetes ökoszisztémák összetétele és működése megsérül. A jövevényfajok legismertebb környezeti hatása, hogy ökológiai szerepük (kompetitív kizárás, kórokozók terjesztése, növényevés, illetve predációs nyomás, mérgező anyagcseretermékek termelése) következtében számos őshonos faj visszaszorul vagy kipusztul. A biológiai invázió összességében tehát alapjaiban veszélyezteti Földünk élő rendszerét, amin az emberiség jólléte áll vagy bukik.

A más biogeográfiai régióból érkező jövevényfajok megtelepedése és térhódítása az elmúlt évszázadban felgyorsult, így hazánkban is több új faj jelent meg, és idézett elő jelentős ökológiai változásokat. Az inváziós állat- és növényfajok megjelenésének Magyarország területén számos és sokszor súlyos társadalmi, gazdasági és természetvédelmi következménye van. A kórokozóktól és azok vektoraitól, a terjeszkedő növényevőkön át a betelepülő ragadozóig, az allergén hatású növényektől a horgászati / dísnövény célra betelepített fajokig egy sor gyakorlati vonatkozású kérdés köthető az invázió jelenségéhez. Ez nemcsak a hazai természetes flórát és faunát veszélyezteti, hanem hasznofajokra és fontos ökoszisztéma-szolgáltatást nyújtó fajokra is kihat, jelentősen csökkentve az erdő- és mezőgazdasági termelés hatékonyságát. Egészségügyi szempontból a jövevényfajok új betegségeket terjeszthetnek, allergiás reakciókat, mérgezési tüneteket válthatnak ki az emberben. A több szinten jelentkező hatások súlyát jelzi, hogy az Európai Unió évente több mint 12 milliárd eurót költ az inváziós fajok elleni védelemre, és az általuk okozott károk kiküszöbölésére, és ez a szám évről évre nő. Az invázió elleni hatékony védekezés kulcsa azonban egy megelőző stratégia lenne, melyhez első lépésben óriási szükség van az invázióbiológiai jelenségek megértésére és folyamatainak rendszerszintű és távoli szakterületeket is átfogó feltárására. Ez a feladat egy szélesebb körű ökológiai diagnosztikai protokoll kidolgozását kívánja meg.

Egy további jelentős rizikófaktor: az urbanizáció

A Föld népessége jelenleg 7,9 milliárd, és évente németországnyi lakossal (kb. 81 millió fő) növekszik. Az elmúlt negyven év elegendő volt ahhoz, hogy megduplázódjon a bolygónkon élő emberek száma (World Population Clock). Ez a túlnépesedés már önmagában is számos problémával jár, de a megnövekedett népesség nagyobbik része már jelenleg is nagyvárosokban lakik, és ez az arány folyamatosan nő. A városlakók számos technológiai vívmányt élveznek, miközben egy téves biztonságérzetben vannak, azt gondolva, hogy biztos távolságra vannak a klímaváltozás különböző hatásaitól, mint például az újonnan felbukkanó betegségektől. Pedig a városok, legyenek látszólag bármilyen gazdagok vagy hatalmasok, rendkívül érzékenyek a betegségekre. Ennek alapvetően hat különböző oka van.

(1) A hősziget jelenség, vagyis hogy a metropoliszok központjában 3–5 fokkal is melegebb van a környezetükhöz képest, amely sokszor elég meleg ahhoz, hogy a kórokozók, vektoraik és rezervoárjaik könnyebben átveszeljék az amúgy őket megtizedelő téli hónapokat. (2) A városok nagymértékben függenek a különböző források (pl. energia, víz, élelmiszer) kívülről történő folyamatos ellátásától. (3) A városok kedvező élőhelyet biztosítanak sünök, patkányok, egerek, mókusok, rókák, galambok számára is, amelyek az emberre és háziállataira nézve veszélyes kórokozókat fenntartó rezervoár gazdák (Rizzoli et al. 2014). Mivel számos élőlény számára vonzó ökoszisztéma a nagyváros (zöld foltok, szemét), ezért olyan bonyolult közösségi dinamika bontakozik ki az ember, kórokozók és más fajok között, amely a mai napig kevésbé feltérképezett (Földvári et al. 2014; Szekeres et al. 2019). (4) A városban nagy egyedsűrűségben élnek emberek, és egy járvány kitörésekor a fertőzésveszély nagysága egyenesen arányos a városban élők számával. Emellett a városi emberek alacsonyabb rokonsági fokkal rendelkeznek a falusi lakossághoz képest, emiatt kisebb a kooperáció és a bizalom a körükben. (5) Egy nagyvárosban mindig találunk olyan réteget, amelynek tagjai kevésbé képzetek, rossz anyagi helyzetűek, alultápláltak, fizikailag kimerítő munkát végeznek gyakran rossz higiénés körülmények között. Ezek az emberek gyakorlatilag láthatatlanok a közegészségügyi és a szociális hálózatok számára, emiatt a városok Achilles-sarkát jelentik. Ha azonban megjelenik egy betegség a nagyvárosban, az nem csupán a szegény és láthatatlan rétegeket fogja érinteni. (6) A nagyvárosok többnyire fontos kereskedelmi és turisztikai központok, forgalmas közúti, vasúti és/vagy légitforgalmi hub-ként működnek, amely megkönnyíti a távoli területek kórokozói és az őket hordozó inváziós vektorfajok behurcolását, így az emberek közti fertőzések létrejöttét. Ez meg is mutatkozott a SARS-CoV-2 nagyvárosi gócaiban Európa- és Amerika-szerte.

Mit tehetünk? A DAMA-protokoll: megelőzés tűzoltás helyett

A kórokozók felbukkanásának hátterében lévő hajtóerők ismeretében kijelenthetjük, hogy a korábban véletlenszerűnek hitt és előre jelezhetetlennek tartott jelenségek mögött egyre jobban ismert ökológiai és evolúciós folyamatok állnak. Ezek ismeretében került kidolgozásra a Stockholm-paradigmára épülő DAMA-protokoll, amelyben folyamatosan rögzítjük (Document) a kórokozók különböző gazdáiban való megjelenését, majd a megfelelő tudományos elemzéseket (Assess) követően azonosítjuk a számunkra veszélyes szervezeteket, és irányítjuk ezek célzott monitorozását (Monitor). Így lehetséges a döntéshozók számára adekvát javaslatokat tenni a megfelelő megelőző intézkedések (Act) foganatosítására.

Dokumentáció

Ahhoz, hogy proaktívak lehessünk, az előtt kell ráatalálnunk a kórokozókra, mielőtt ők találnak ránk. Nem lehetséges minden potenciális gazdaszervezetben az összes lehetséges kórokozót dokumentálni, viszont felhasználhatjuk e kórokozók evolúciójáról, ökológiájáról és természetes ciklusáról meglévő tudásunkat arra, hogy kutatásaink irányát fókuszáljuk. A kórokozókat tünetmentesen hordozó rezervoár gazdákat kell kiemelt figyelemmel kísérnünk. Ezek a kórokozók természetben való fenntartásáért felelős fajok gyakran az emberi településekkel vagy mezőgazdasági területekkel közvetlenül határos élőhelyeken találhatók. A kórokozók átvitele sokszor itt, a rezervoár fajok élőhelye és a haszonállatok és -növények élőhelye közötti határterületen történik. Így az élőhelyek szempontjából is szűkíteni tudjuk a

megelőzésre irányuló vizsgálatainkat, amellyel jelentős pénz és idő takarítható meg. A kórokozók egy népes és kiemelt jelentőségű csoportja vektorokkal, azaz vérszívó ízeltlábúakkal terjednek (pl. kullancsokkal vagy szúnyogokkal, 2. ábra), rájuk kiemelt hangsúlyt kell helyezni a dokumentáció során. Ezek vizsgálatában nagy segítséget nyújthat a lakosság is (citizen science), hiszen segítségével szélesebb földrajzi régiókban és nagyobb mintaszám gyűjthető. Ennek megvalósítására két hazai gyakorlati példa az Ökológiai Kutatóközpont két ilyen jellegű monitoring projektje, a Szúnyogmonitor (<https://szunygmonitor.hu/>) és a Kullancsfigyelő (<https://www.kullancsfigyelo.hu/>) kezdeményezések.

Elemzés

Egy olyan világban, amelyet az emberi tevékenység és a klímaváltozás formál, nem akadályozhatjuk meg a kórokozókat a földrajzi elterjedésük növelésében, de felkészülhetünk rájuk kockázatbecsléssel, ami az értékelés lényege. A kockázatbecsléshez minél többet kell tudnunk azokról a fajokról, amelyek eddig is körülöttünk voltak, továbbá azokról, amelyek megjelenésére számíthatunk. A tudományos név egy fontos elsődleges adat. A patogén esetében további alapinformáció, hogy hol és milyen gazdaszervezetben fordulnak elő. Az ismert kórokozók esetében is szükség van a fajnév mellett a terjedésének módjára, az esetleges tünetekre, a gazdaszervezetben fertőzött szövetekre, az előfordulási területükre, az okozott mortalitásra és morbiditásra, a genetikai változékonyságra, a jellemzően fertőzött ökoszisztémákra, továbbá, hogy milyen országokban vagy régiókban milyen betegséget okoztak, és hogy milyen gazdaszervezetekben dokumentálták őket eddig. Ezért szükséges minden



2. ábra

Balra: az ázsiai tigrisszúnyog (*Aedes albopictus*) kiemelt fontosságú vektor. Terjesztője a sárgaláz, a dengue, a Chikungunya-vírusoknak, valamint számos fonálféregnek, pl. a kutyák szívférgességét okozó *Dirofilaria immitis*-nek. *Jobbra:* a *Hyalomma rufipes* kullancsfaj a magas halálozási arányú krími-kongói vérzéses láz vírusát terjeszti. Mindkét vektorfaj megjelent már Magyarországon. Az újból történő behurcolásukból és helyi terjedésükből fakadó veszélyek csak célzott folyamatos monitorozással előzhetőek meg.

Forrás: https://hu.wikipedia.org/wiki/%C3%81zszai_tigrissz%C3%BAnyog#/media/F%C3%A1j:Aedes_Alboipictus.jpg és <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hyalomma-rufipes-female-male.jpg>



alapos kockázatbecslést megfelelő taxonómiai dokumentációval kezdeni, és azt kiegészíteni a kapcsolódó ökológiai információval az értékelés során.

Annak érdekében, hogy megszakítsuk a betegségek terjedését, gyakran az ökológiai diverzitás bizonyos elemeire (kiemelt kórokozók és rezervoárjaik) kell koncentrálnunk. De nem monitorozhatunk mindenhol és mindent, emiatt a kockázatbecslés során az egyes kórokozók relatív fontosságát szükséges megállapítani. Kiemelt jelentőséget kapnak azok a vírus-, baktérium- vagy parazita-fajok, amelyek ismert kórokozók, és a hozzájuk genetikailag legközelebb álló rokon fajok is magasabb rizikócsoportba kerülnek. A fajok leszármazási viszonyait vizsgáló filogenetika segítségével epidemiológiai előrejelzéseket fogunk tenni a múltban konzervatívnak bizonyult tulajdonságok alapján.

Az így felhalmozódó, a kockázatbecslésre vonatkozó járványökológiai információ létfontosságú lesz a további munkánk szempontjából, és fontos kiegészítőjét képezi a publikált adatok alapján végzett metaanalíziseinknek. A végeredményként kiépült adatbázisunkat olyan matematikai modelleknek és gépi tanulási rendszernek vetjük alá, amely az újonnan felbukkanó fertőző kórokozók evolúciós dinamikájáról és ökológiájáról szerzett tudásunkon alapszik. Így tesztelhetjük majd a Stockholmparadigma gyakorlati alkalmazhatóságát. Ha a tapasztalatok nem teljesen csengenek össze az elméleti elvárásokkal, akkor finomításokat szükséges elvégezni a keretrendszeren és a DAMA akcióterven.

Monitorozás

A monitoring meghatározza, hogy mennyire vagyunk felkészültek a kórokozók felbukkanására. Dokumentáljuk azokat a kórokozókat, amelyekkel együtt élünk, és ami a legfontosabb, azokat, amelyek még az utunkba kerülhetnek. Amennyire csak lehet, felbecsüljük a veszélyt, amelyet felbukkanásuk jelent. A folyamatosan növekvő információhalmaz lehetővé teszi, hogy nyomon követhessük a kórokozók előretörését, és egyúttal saját felkészültségünket is. A monitorozás egyfajta korai jelzőrendszer, amely a lehető leghamarabb figyelmeztet minket, ha egy potenciálisan veszélyes kórokozóval kerülhetünk kapcsolatba.

A matematikai modellek nagy segítséget nyújthatnak előrejelzéseinkhez. A mindedig ismeretlen, de kockázatot jelentő kórokozók, rezervoárjaik és vektoraik közül azokra kell összpontosítanunk, amelyek láthatólag növekszik a földrajzi elterjedésüket és az ökológiai forrásbázisukat. A DAMA-protokoll ezen eleme erősen ökológia-, evolúció- és populációbiológia központú. Ahogy a molekuláris dokumentálási technológiák egyre inkább fejlődnek, illetve a filogenetikai és ökológiai kapcsolatokat tartalmazó adatbázisunk is növekszik, annál költségkímélőbb módon tudjuk majd folyamatosan monitorozni a veszélyforrásokat.

Cselekvés

A tudományos információ önmagában nem elegendő. Fel kell használnunk azt az információt, amit a dokumentációs, értékelő és monitoring szakaszokból nyertünk, és cselekednünk kell! Eredményeinkre épül egy Akciótanács működése, amelyben a kutatók mellett helyet kapnak az érintett hatóságok képviselői (közegészségügy, állategészségügy, katasztrófavédelem, turizmus), és amely konkrét javaslatokat tesz a döntéshozók felé. A kormányzati döntéshozók számára hozzáférhetővé fogjuk tenni a lehető legjobb és legfrissebb tudományos eredményeket. Ezt az információt közérthető módon kell eljuttatnunk hozzájuk, hogy a szakhatóságok megtalálják az egyensúlyt a tudományos szempont és a számos más társadalmi és gazdasági prioritás között. Az egyenes és érthető kommunikáció megvalósítása tehát mind a kutatók, mind a döntéshozók érdeke és feladata is egyben. A hosszú távú siker kulcsa pedig az, hogy a cselekvési oldalon be kell vonnunk a lakosságot is, ahogy a fent említett két citizen science projekt esetében is történik (3. ábra).



3. ábra

A krími-kongói vérzéses láz életveszélyes állapotot eredményez. Megelőzésében nagy szerepet játszik a lakosság bevonásával (citizen science) zajló monitorozás, amely lehetővé teszi, hogy a vírust terjesztő *Hyalomma* kullancsok megjelenéséről tudomást szerezzünk

Forrás: Elaldı-Kaya 2014

Következtetések, stratégiai javaslatok

Ahhoz, hogy elkerülhessük a jövőben kitörő járványokat, alapvetően kell változtatnunk a gondolkodásmodunkon. Egyrészt a döntéshozói és a kutatói, egészségügyi oldalon a reaktív üzemmódból proaktívba kell váltani (ld. DAMA-protokoll, vagy egy szélesebb körű ökológiai diagnosztika az invázió vonatkozásában). Másrészt a társadalom legszélesebb körében szükséges egy alapvető, gondolkozásbeli és viselkedésbeli változás (Daszak et al. 2020), amely a fenntartható fejlődés révén mérsékelheti a járványveszélyt. Mindehhez számos területen átfogó változtatások szükségesek, amelyeket az

1. táblázat | A jövőbeli járványok kitörésének megelőzéséhez elengedhetetlen alapvető gondolkozásbeli és viselkedésbeli változások (Daszak et al. 2020 alapján)

FELADAT	RÉSZLETEK
Magas szintű kormányközi járványmegelőzési testület létrehozása	<ul style="list-style-type: none"> Az IPCC (klímaügyi) és az IPBES (biodiverzitással kapcsolatos) kormányközi testületek mintájára Tanácsadás, előrejelzés a döntéshozók számára Monitoring feladatok koordinálása (ld. DAMA)
Gazdasági ösztönzők bevezetése	<ul style="list-style-type: none"> Járványveszéllyel kapcsolatos költségek integrálása a termelői, fogyasztói és állami költségvetésekbe Zöld befektetési formák létrehozása a természet- és klímavédelmi, valamint a járványmegelőzési célok finanszírozására Megújuló energiaforrások támogatása
Intézkedések a természetpusztítás megállítására	<ul style="list-style-type: none"> Felbukkanó kórokozók és járványok egészségügyi kockázatának felmérése beruházásoknál és földhasználati projekteknél Anyagi támogatások reformja, amely figyelembe veszi a beruházások biodiverzitásra és egészségre gyakorolt káros és előnyös hatásait Annak felmérése, hogy milyen mértékben csökkenthető a kórokozók felbukkanásának veszélye élőhelyek természetközeli állapotba hozásával (restaurációs ökológia) Gondolkozásmód és viselkedés alapvető változásának elősegítése annak érdekében, hogy csökkenjen a nem fenntartható fogyasztás és mezőgazdasági terjeszkedés (pálmaolaj, egzotikus fák, extenzív szarvasmarha-tenyésztés stb.)
Intézkedések a vadkereskedelem visszaszorítására	<ul style="list-style-type: none"> Egyezmény létrehozása a nemzetközi vadkereskedelem jelentette járványveszély csökkentésére az OIE, CITES, CBD, WHO, FAO, IUCN közreműködésével A valószínűsíthető járványkitörési pontokon a lehető legszélesebb körű oktatás a vadállatok használata és kereskedelme mint járványveszély témájában A kórokozók felbukkanása szempontjából magas rizikójúknak bizonyult fajok teljes kivonása a vadkereskedelemből Élőállati piacok szabályozása (hűtőkapacitás, higiénia, kórokozó monitoring) Kórokozó monitoring a kereskedelemben vont állatfajok, vadászok, tenyésztők és kereskedők körében Bűnmegelőzés erősítése az illegális vadállat-kereskedelem visszaszorítására
Kritikus tudáshiányunk pótlása	<ul style="list-style-type: none"> Evolúciós és ökológiai szemlélet erősítése a járványmegelőzésben (Stockholm-paradigma, DAMA) A természetben található kórokozódiverzitás alaposabb feltérképezése Gyógyszerek és vakcinák szempontjából kiaknázni a felfedezésre váró mikrobákat A klímaváltozás, ökoszisztéma-pusztulás hatásai és a járványok kitörése közti összefüggések pontosabb megértése A pandémiás veszélyt csökkentő természetvédelem gazdasági megtérülését vizsgáló ökonómiai vizsgálatok Kulcsfontosságú viselkedésmódok vizsgálata a pandémiás helyzet létrehozásában (globális fogyasztás, járványgócokban élő helyi közösségek, privát és állami szektor szerepe) Bennszülött és helyi lakosság bevonása és tudásának értékelése a preventív programokban A One Health szemlélet operatív tétele és intézményesítése a járványmegelőzési stratégiáink optimalizálása érdekében (ld. DAMA)
Széles körű társadalmi szerepvállalás erősítése a járványmegelőzésben való részvétel erősítésére	<ul style="list-style-type: none"> A járványok kialakulásáról való ismeretterjesztés és oktatás a társadalom minden rétegében, de hangsúlyosan a fiatal generációban Járványtani szempontból kockázatos fogyasztói szokások azonosítása és megjelölése az alternatívák támogatása érdekében (pl. prémjüket tenyésztett vadállatok) Fenntarthatóság ösztönzése a mezőgazdaságban Egészségesebb és fenntarthatóbb táplálkozás felé való elmozdulás támogatása (pl. felelős húsfogyasztás) Fenntartható eszközök támogatása a nagyobb élelmiszer-biztonság és a vadhúsfogyasztás csökkentése érdekében Magas pandémiás rizikó esetén a hús és egyéb termék fogyasztására és előállítására kirótt adó megfontolása Fenntartható támogatások vállalatok számára olyan tevékenységek elkerülésére (pl. természetpusztítás, mezőgazdaság, vadhúsfeldolgozás és -kereskedelem), amely igazoltan kiemelt zoonotikus kockázattal jár

1. táblázatban foglaltunk össze. A kérdés nem az, hogy hogyan, hanem az, hogy mikor kezdődnek el ezek a változások, hiszen nemcsak anyagi értelemben megtérülő befektetés lenne, hanem kortársaink és utódaink jelentős részének az élete múlik rajta.

Irodalomjegyzék

Apari, P., Bajer, K., Brooks, D. R., Molnár, O., (2019) Hiding in plain sight: An evolutionary approach to the South American Zika outbreak and its future consequences. *Zoologia (Curitiba)*, Vol. 36. pp. 1–7. <https://doi.org/10.3897/zoologia.36.e36272>

Brooks, D. R., Hoberg, E., Boeger, W., Gardner, S., Araujo, S., Bajer, K., Botero-Cañola, S., Byrd, B., Földvári, G., Cook, J., Dunnum, J., Dursahinhan, A., Garamszegi, L., Herczeg, D., Jakab, F., Juarrero, A., Kemenesi, G., Kurucz, K., León-Règagnon, V., Mejía-Madrid, H. H. Molnár, O., Nisbett, R. A., Preiser, W., Stuart, M., Szathmari, E. & Trivellone, V. (2020) Before the Pandemic Ends: Making Sure This Never Happens Again. *World Complexity Science Academy Journal*, Vol. 1. No. 1. 1–10.

Brooks, D. R., Hoberg, E. P., & Boeger, W. A. (2019). *The Stockholm Paradigm: Climate Change and Emerging Disease*. University of Chicago Press

Brooks, D. R., Hoberg, E. P., Boeger, W. A., Gardner, S. L., Galbreath, K. E., Herczeg, D., Mejía-Madrid, H. H., Rácz, S. E., & Dursahinhan, A. T. (2014) Finding Them Before They Find Us:

- Informatics, Parasites, and Environments in Accelerating Climate Change. *Comparative Parasitology*, Vol. 81. No. 2. pp. 155–164. <https://doi.org/10.1654/4724b.1>
- Carroll, D., Daszak, P., Wolfe, N. D., Gao, G. F., Morel, C. M., Morzaria, S., Pablos-Méndez, A., Tomori, O., & Mazet, J. A. K. (2018) The Global Virome Project. *Science*, Vol. 359. No. 6378. pp. 872–874. <https://doi.org/10.1126/science.aap7463>
- Daszak, P., das Neves, C., Amuasi, J., Hayman, D., Kuiken, T., Roche, B., Zambrana-Torrel, C., Buss, P., Dundarova, H., Feferholtz, Y., Földvári, G., Igbinosa, E., Junglen, S., Liu, Q., Suzan, G., Uhart, M., Wannous, C., Woolaston, K., Mosig Reidl, P., O'Brien, K., Pascual, U., Stoett, P., Li, H., & Ngo, H. (2020) *Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*. IPBES Secretariat. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4147318>
- Dobson, A. P., Pimm, S. L., Hannah, L., Kaufman, L., Ahumada, J. A., Ando, A. W., Bernstein, A., Busch, J., Daszak, P., Engelmann, J., Kinnaird, M. F., Li, B. V., Loch-Temzelides, T., Lovejoy, T., Nowak, K., Roehrdanz, P. R., & Vale, M. M. (2020) Ecology and economics for pandemic prevention. *Science*, Vol. 369. No. 6502. pp. 379–381. <https://doi.org/10.1126/science.abc3189>
- Elaldi, N., & Kaya, S. (2014) *Crimean-Congo Hemorrhagic Fever*. <https://doi.org/10.5799/AHINJS.02.2014.S1.0135>
- Földvári, G., Jahfari, S., Rigó, K., Jablonszky, M., Szekeres, S., Majoros, G., Tóth, M., Molnár, V., Coipan, E. C., & Sprong, H. (2014) Candidatus *Neoehrlichia mikurensis* and *Anaplasma phagocytophilum* in Urban Hedgehogs. *Emerging Infectious Diseases*, Vol. 20. No. 3. pp. 496–498. <https://doi.org/10.3201/eid2003.130935>
- Földvári, G., & Szathmáry, E. (2020) Klímaváltozás: Nyilvánvaló és rejtett veszélyek. In: Szathmáry Eörs (szerk.): *Klímaváltozás és Magyarország*. Osiris, Budapest. pp. 55–73.
- Gibb, R., Redding, D. W., Chin, K. Q., Donnelly, C. A., Blackburn, T. M., Newbold, T., & Jones, K. E. (2020) Zoonotic host diversity increases in human-dominated ecosystems. *Nature*, Vol. 584. No. 7821. pp. 398–402. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2562-8>
- Jones, K. E., Patel, N. G., Levy, M. A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J. L., & Daszak, P. (2008) Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, Vol. 451. No. 7181. pp. 990–993. <https://doi.org/10.1038/nature06536>
- Rizzoli, A., Silaghi, C., Obiegala, A., Rudolf, I., Hubálek, Z., Földvári, G., Plantard, O., Vayssier-Taussat, M., Bonnet, S., Špitalská, E., & Kazimírová, M. (2014) *Ixodes ricinus* and Its Transmitted Pathogens in Urban and Peri-Urban Areas in Europe: New Hazards and Relevance for Public Health. *Frontiers in Public Health*, Vol. 2. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00251>
- Szekeres, S., Leeuwen, A. D. van, Tóth, E., Majoros, G., Sprong, H., & Földvári, G. (2019) Road-killed mammals provide insight into tick-borne bacterial pathogen communities within urban habitats. *Transboundary and Emerging Diseases*, Vol. 66. No. 1. pp. 277–286. <https://doi.org/10.1111/tbed.13019>
- Windsor, D. A. (1998) Most of the species on Earth are parasites. *International Journal for Parasitology*, Vol. 28. No. 12. pp. 1939–1941. DOI: 10.1016/s0020-7519(98)00153-2.
- World Population Clock: 7.9 Billion People (2021) - Worldometer*. (n.d.). Retrieved 29 April 2021, from <https://www.worldometers.info/world-population/>
- Zana, B., Erdélyi, K., Nagy, A., Mezei, E., Nagy, O., Takács, M., Bakonyi, T., Forgách, P., Korbacska-Kutasi, O., Fehér, O., Malik, P., Ursu, K., Kertész, P., Kepner, A., Martina, M., Süli, T., Lanszki, Z., Tóth, G. E., Kuczmozg, A., Somogyi, B., Jakab, F., & Kemenesi, G. (2020) Multi-Approach Investigation Regarding the West Nile Virus Situation in Hungary, 2018. *Viruses*, Vol. 12. No. 1. <https://doi.org/10.3390/v12010123>