ADALÉKOK AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS TUDOMÁNYOS HÁTTERÉHEZ

Additions to physical science background of climate change

MIKA JÁNOS
Eszterházy Károly Katolikus Egyetem Földrajz- és Környezettudományi Intézet, Eger
mika.janos@uni-eszterhazy.hu

ABSTRACT

In a previous paper scientific background of climate change was comprehended (Mika J. 2019), mostly based on the Fifth Assessment Report (IPCC 2013). Since then, the Intergovernmental Panel on Climate change issued the Physical Science Basis of Climate Change in its Sixth Assessment Report (IPCC 2021). The present paper surveys the key aspects of climate change established by the new report and presents them in the structure of our former study. The main conclusion of the paper is that the new report reinforces the previous conclusions concerning the human contribution to the warming trends, and supports the projected changes for the future. Some open details remained challenging future research efforts.

Keywords: IPCC, regional climate changes, extreme events, scenario, adaptation, mitigation

BEVEZETÉS

Az **éghajlatváltozás** továbbra is gyakori témája a közbeszédnek, amiről a tanároknak is érdemes tájékozódniuk, hogy segíthessék tanulóik véleményének kialakulását ebben a szövevényes és szinte minden tágabb problémával (energia, környezet, gazdaság) is összefüggő kérdéskörben. Ehhez kívánt segítséget nyújtani korábbi tanulmányunk (Mika J. 2019), amely még az *Éghajlatváltozási Kormányközi Testület* előző jelentésén (IPCC 2013) alapult. Azóta az IPCC újabb három kötetben (2021, 2022a, b) tárta az érintett szakmák és a döntéshozók elé az utóbbi mintegy nyolc év változásait és tudományos eredményeit. A három kötetet összefoglaló Szintézis Jelentésről lásd a következő oldal lábjegyzetét. Jelen tanulmány ezeket az újdonságokat foglalja össze az újabb jelentések első, a természettudományos kutatásokat összefoglaló kötete (a továbbiakban: Jelentés) alapján, mégpedig az előző tanulmányunkkal azonos fejezetekben. E 12 fejezet közül 9-hez tudunk új eredményeket mutatni, háromhoz nem, mert azok tárgya a további kötetekhez tartozik. Megjegyezzük, hogy az első kötet terjedelme minden mellékletet és kiegészítést figyelembe véve mintegy négyezer oldal.

GeoMetodika 7. 2. (2023) pp. 5–26. DOI: https://doi.org/10.26888/GEOMET.2023.7.2.1

A figyelembe vett *Jelentés* sajtóösszefoglalója 14 pontban összesíti a legfontosabb következtetéseket, amely megfogalmazások mindegyike szó szerinti átvétele a *Jelentés* döntéshozói ősszefoglalójában pontosan így szereplő és így tagolt állításoknak. Fontos tény ezzel kapcsolatban az, hogy ez a döntéshozói összefoglaló az a dokumentum, amit az IPCC közgyűlése 2021. augusztus elején szóról szóra megtárgyalt, és végül elfogadott.

Az összefoglaló első pontja, amelyre a *Jelentés* ismertetői a leggyakrabban hivatkoznak, a következő: *Egyértelmű, hogy az emberi tevékenység melegítette a légkört, az óceánokat és a szárazföldeket. Széleskörű és gyors változások mentek végbe a légkörben, az óceánokban, a hó- és jégtakaróban és a bioszférában.* Az első mondat az IPCC-jelentések sorában most először tekinti ténynek az antropogén hatást, de sem ez a mondat, sem a folytatás nem tartalmaz állítást arra nézve, hogy mekkora az **emberi tevékenység** részaránya a teljes változásban. A korábbi IPCC-dokumentumok jelentésről jelentésre egyre nagyobb valószínűségűnek – 67%, 90%, majd legutóbb már 95% – mondták az emberi hatások jelenlétét, de megfogalmaztak valamilyen mértéket is ehhez az állításhoz. Már az *ötödik jelentés* (2013) is például úgy fogalmazott, hogy *kiemelkedően valószínű* – az IPCC szóhasználatában legalább 95%-os – *annak a valószínűsége, hogy a 20. század közepén kezdődött melegedés legalább feléért az emberi tevékenység a felelős*. A *Jelentés* legfontosabb újdonságának tekintett állítás, az emberi hatások vitathatlanná válása valójában nem jelenti a tudomány bizonyosabbá válását abban, hogy mit is állíthatunk az emberi hatások mértékéről.[1]

További sajátossága a *Jelentés*nek az, hogy az eredményeket összesítő állítások igazsága valószínűségének, vagy a bizonyítékok egybehangzóságának mértékére utaló minősítéseket alkalmaznak a szakemberek. Ezek néha nehezen értelmezhető megállapítások, emiatt – hacsak külön nem említem – a tanulmányban csak azokat az állításokat ismertetem, amelyek a *Jelentés* szerint legalább nagy („very likely", azaz 90%-os) valószínűségűek, illetve magas bizonyosságúak („high confidence").

AMIT AZ ADATOK BIZONYÍTANAK

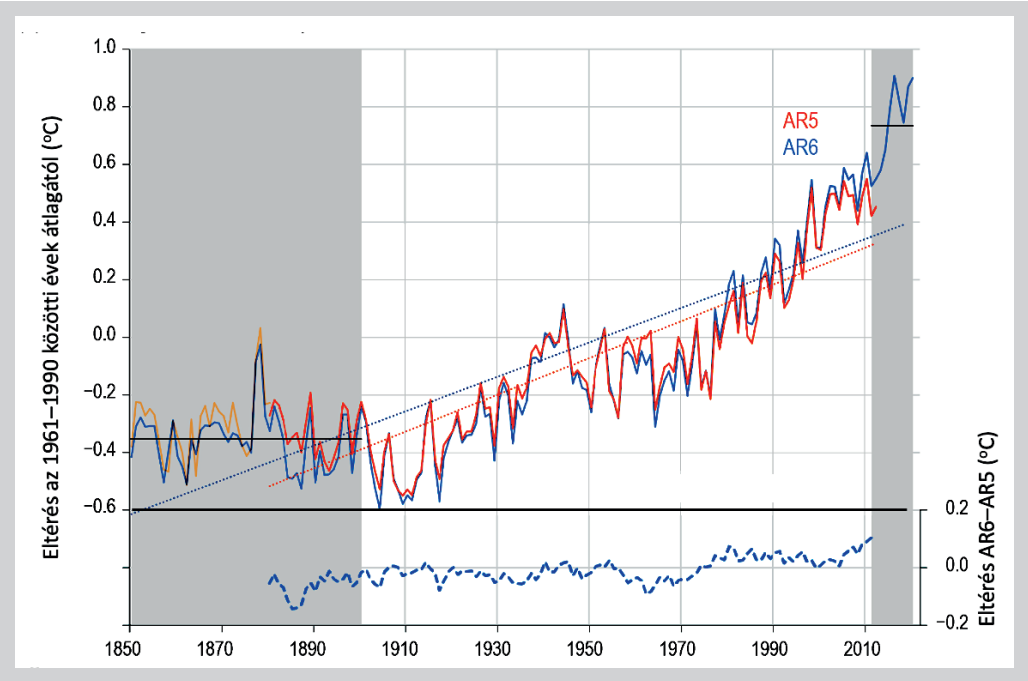
Miben mutatkozik meg a globális felmelegedés?

Folytatódott **a felszín közeli léghőmérséklet emelkedése**. A 2011–2020 közötti időszak évi átlaghőmérséklete 1,09 °C-kal magasabb volt, mint az 1850–1900 közöttié. Ezen belül

1 A hivatkozott Jelentés 2021. augusztusi megjelenése után közel másfél évvel napvilágot látott az IPCC Hatodik Jelentésének záró kötete a Szintézis Jelentés, amelynek tartalmát az IPCC Közgyűlése 2023. március 19-én jóváhagyta és közzé tette (https://www.ipcc.ch/ar6-syr/). Ennek – még szerkesztés alatt álló, s emiatt szövegszerűen nem idézhető – egyik első mondata értelmében a teljes, globális átlagban 1,1 °C-os melegedés az emberi tevékenységnek tulajdonítható. E sorok írója szerint az emberi tevékenység hatásának részaránya a teljes megfigyelt változásban valahol az előző (50%) és a mostani (100%) becslés között lehet.

a felszíntől 2 m magasságban megfigyelt változás a szárazföldek felett mindenütt 1,59 °C. Az óceánok fölött – ahol nincsenek 2 m-rel a vízfelszín fölötti mérések, a tengervíz hőmérsékletét a hajók fedélzetén megfigyelt értékekkel kombinálva becsülik – a változás kisebb mint 1 °C.

Az 1. ábrán a földi **átlaghőmérséklet** két egymás utáni jelentésben (IPCC 2013, 2021) közölt alakulása mellett az is látható, hogy a tényleges melegedést a két jelentésben alkalmazott módszertani eltérések is emelték bő 0,1 °C-kal. Ilyen eltérés például az, hogy az ipari forradalom előtti referenciaértéket a korábbiaknál hűvösebb 1850–1900 közötti időszakból vették. Módosult a globális átlaghőmérséklet számítási módja is: amíg a szárazföldek felett továbbra is a levegő jól értelmezhető és átlagolható, a felszíntől 2 m-re mért hőmérsékletet vonják be a területarányos átlagolásba, addig az óceánok felett (ahol a mérések túlnyomó hányadát végző kereskedelmi hajók fedélzete jóval magasabb, és a hajótest nem kívánatos befolyást gyakorol a levegő hőmérsékletére) a tengervíz hőmérsékletéből becsült léghőmérséklettel számolnak. Korábban itt a víz hőmérsékletének eltérésével számoltak. A globális átlaghőmérséklet új idősorában



1. ábra. A földi átlaghőmérséklet megfigyelt változásai a korábbi (AR5) és a mostani (AR6) Jelentés szerint (felül), valamint a két összesítés közötti eltérés (alul). (Megjegyzés: az AR5 Jelentésben 1880 előttről csak egy globális adatsor állt rendelkezésre, ezért sárga ez a grafikonszakasz, és nem vonatkozik rá a lineáris trendvonal sem.) (IPCC 2021 CCBox 2.3, Fig. 1b)

kevésbé mutatkozik az ún. **globális melegedés hiány** (lassulás) átmeneti jelensége (2003–2012, lásd bővebben Mika J. 2019) is, amelyre az újabb rekonstrukció is emelte a hőmérsékletet 0,1 °C-kal. Megjegyezzük, hogy minden számítás az adott pontban (gömbi négyzetben) érvényes referenciaidőszak átlagától vett eltérés, amivel biztosítható, a globális átlaghőmérsékletet ne torzítsa az, hogy miként tolódott a rendelkezésre álló mérések „súlypontja" egyre északabbra.

Az éghajlat legismertebb indikátora a felszínközeli léghőmérséklet, de ezen kívül még számos más éghajlati változó alakulását ismerjük. Ezek közül a legfontosabb trendeket az 1. táblázatban foglaljuk össze.

A szárazföldek felett átlagolt csapadék az 1980-as évek óta emelkedik (vö. 6. ábra). A ciklonpályák 1980-hoz képest mindkét félgömbön a pólusok felé tolódtak el. A hegyvidéki gleccserek egyértelműen visszahúzódtak az utóbbi évtizedekben. Az északi félgömb tengeri jégtakarója az 1979–1988 és a 2010–2019 közötti három évtizedben 40%-kal csökkent a legkisebb kiterjedésű szeptember hónapban, míg a legnagyobb kiterjedéssel jellemezhető március hónapban a csökkenés kb. 10%.

Az óceánok felső 700 m-es rétege 1970 óta sokat melegedett. A tengervíz kémhatása az enyhén lúgos 8,1 értékről kis mértékben a semleges felé tolódott, amit – félrevezető módon

Közeg	Változó és alakulása
Légkör	Általános légkörzés ↑↓
	Hőmérséklet a felszínen ↑
	Hőmérséklet a magasban ↑
	Vízgőztartalom ↑
Óceánok	Tengerfelszín hőmérséklete ↑
	Óceánok hőtartalma ↑
	Tengervíz szintje ↑
	Óceán „savasodása" ↑
	Fajtaeltolódás a sarkok felé ↑
Szárazföldek	Csapadékbevétel ↑
	Tenyészidőszak hossza ↑
	Növényi zöldtömeg ↑
	Fajtaeltolódás a sarkok felé↑
Krioszféra (szilárd halmazállapotú víz közege)	Örökfagy kiterjedése ↓
	Jéghátságok vastagsága ↓
	Hótakaró kiterjedése ↓
	Tengeri jég kiterjedése az északi félgömbön↓
	Gleccserek kiterjedése ↓

1. táblázat. Megfigyelt változások az éghajlatban a 19. század vége óta (IPCC 2021 FAQ 2.2, Fig. 1 alapján szerk. Mika J.)

– savasodásnak mondunk. A jelenség oka **a szén-dioxid koncentrációjának folyamatos emelkedése**, ami a tengervízben szénsavvá alakul. A tengervíz oxigéntartalma is csökkent a 20. század közepe óta, de az még nem egyértelmű, hogy ebben mekkora az éghajlat ember általi módosításának szerepe. A tengervíz szintje 1901 és 2018 között 20±5 cm-rel emelkedett. A **tengerszintemelkedés** 1971-ig csak 1,3 mm/év volt, ami 1971–2006 között 1,9 mm/évre, majd 2006–2018 között 3,7 mm/évre nőtt. Nagyon valószínű, hogy ennek fő oka legalább 1971 óta az ember okozta felmelegedés, ami ebben az időszakban így oszlott meg a különböző geofizikai folyamatok között: a változás 50%-áért a tengervíz hőtágulása a felelős, 22%-át a hegyvidéki gleccserek olvadása okozta, a szárazföldek jéghátságainak olvadása további 20%-kal járult hozzá a változásokhoz, míg a fennmaradó 8% a szárazföldi rétegek csökkenő víztározásának tulajdonítható.

A **szárazföldi bioszféra övezetei** a pólusok felé húzódtak mindkét félgömbön. Az északi félgömb trópuson kívüli területein az 1950-es évektől kezdve a növények tenyészidőszakai évtizedenként 2 nappal hosszabbak lettek. Valószínű, hogy a legerősebb, 3-5-ös fokozatú trópusi ciklonok részaránya is nőtt az utóbbi négy évtizedben, miközben az összes trópusi ciklon gyakorisága nem változott egyértelmű irányban. Ugyancsak nem rendelkezünk egyértelmű ismeretekkel arról, hogy miként módosult a trópusi ciklonok veszélyessége, ezen belül is elsősorban az árvizeket okozó csapadékhozama.

Az éghajlat változása hatással van számos időjárási és éghajlati szélsőség alakulására is. A *Jelentés* szerint erősödött a kutatók meggyőződése abban, hogy ezek a változások összefüggnek a globális felmelegedéssel. Ezen belül szinte biztos, hogy kontinenseken **a forró szélsőségek gyakoribbakká és intenzívebbekké** váltak az 1950-es évek óta, és több az óceánok fölötti hőhullám is, mint az 1980-as éveket megelőzően. Ugyanakkor a hideg szélsőségek ritkábbak és enyhébbek lettek. A legtöbb szárazföldi térségben, ahol kellően hosszú idősorok állnak rendelkezésre, gyakoribbak és intenzívebbek lettek a heves csapadékok, amit szintén az antropogén felmelegedésnek tulajdoníthatunk. Ugyanakkor a felmelegedés miatt erősödő párolgás egyes szárazföldi régiókban növelte az **aszályok** gyakoriságát. Jelentős, több évtizedes ingadozások figyelhetők meg a monszuntérségek csapadékának alakulásában, amiben az aeroszoloknak az 1950-es és 1980-as évek közötti növekvő, majd csökkenő kibocsátása is szerepet játszhatott.

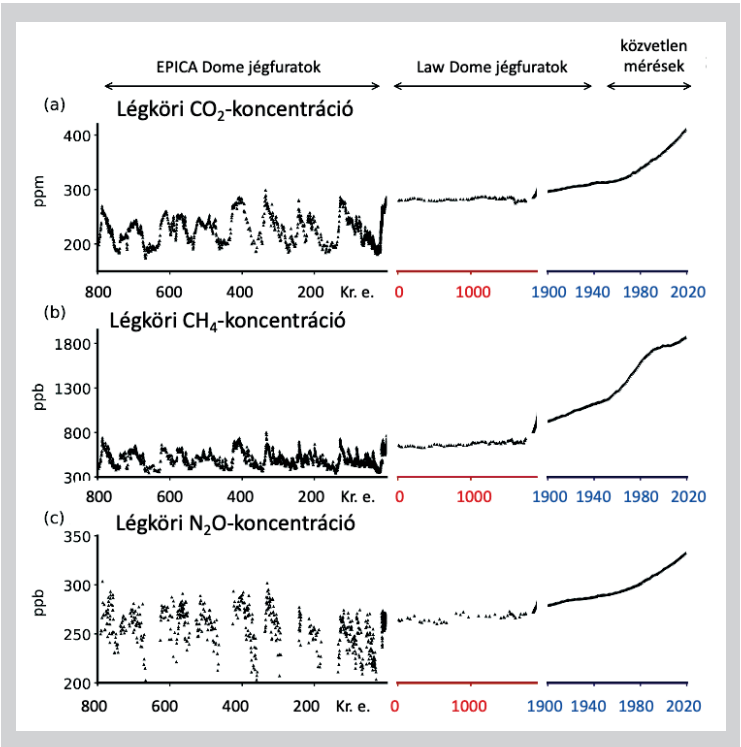
Ennek a bekezdésnek azt az állítását, miszerint *erősödött a kutatók meggyőződése abban, hogy ezek a változások összefüggnek a globális felmelegedéssel*, azzal a megjegyzéssel tudom elfogadni, ahhoz, hogy bizonyosnak mondhassuk a szélsőségekben fellépő tendenciák emberi eredetét, még tovább kell fejleszteni az éghajlati modelleket. Tanulmányunk záró fejezetében ugyanis a 9. ábra azt bizonyítja, hogy bár az előző jelentés óta javult, de még mindig hibával terhelt az általános légkörzés legnagyobb kiterjedésű ún. lezáró anticiklonjai gyakoriságának szimulációja. Márpedig ha a jelenlegi állapot

szimulációja hibával terhelt, akkor hogyan legyünk bizonyosak abban, hogy a cirkuláció megváltozásának szimulációja – kivált a szélsőségek nagy részét okozó, kisebb léptékű folyamatok esetében – megfelelő?

Miben más a mostani, mint a korábbi változások?

Számos éghajlati kényszer és éghajlati következmény már most olyan értékeket vett fel, amelyekre több száz, sőt több ezer éve nem volt példa bolygónk történetében. Kezdjük a bemutatást az **üvegházgázok** bemutatásával, amelyek kb. 1750 óta az emberi tevékenység hatása alatt állnak (2. ábra). A megelőző 800 ezer év üvegházgáz-koncentrációit az Antarktisz két vastag jéghátságából vett jégfuratok őrizték meg a kutatók számára.

A szén-dioxid-koncentráció földi átlagos értéke 2019-re elérte a 410 ppm értéket, ami 47%-kal haladja meg az 1750. évre becsült értéket. Ilyen magas koncentráció az utóbbi 2 millió évben nem fordult elő! A metán koncentrációja 1866 ppb, a dinitrogén-oxidé



2. ábra. A legfontosabb üvegházhatású gázok koncentrációinak alakulása a légkörben az utóbbi 800 ezer évben (Megjegyzés: ppm – milliomodrész térfogat, ppb – milliárdomodrész térfogat.) (IPCC 2021, Fig. 5.4)

332 ppb volt 2019-ben, ami 156%-os, illetve 23%-os növekedésnek felel meg 1750 óta. Mindkét érték példa nélkül áll az utóbbi nyolcszázezer év földtörténetében.

Tovább haladva a földtörténeti összehasonlításban megállapíthatjuk, hogy az 1970 óta bekövetkezett melegedés üteme gyorsabb volt, mint bármely korábbi 50 éves tendencia az utóbbi kétezer évben. A legutóbbi teljes évtized (2011–2020) átlaghőmérséklete meghaladja az utóbbi 6500 év bármely hasonló időszakának hőmérsékletét. Ugyanennek az évtizednek a nyár végi tengeri jégkiterjedése az északi félgömbön kisebb volt, mint az utóbbi ezer évben bármikor. A hegyvidéki gleccserek 1950 óta megfigyelt globális visszahúzódása példa nélküli legalább az utóbbi kétezer évben. A tengervíz szintjének 1900 óta megfigyelt emelkedése gyorsabb, mint ami az utóbbi 3000 évben előfordult. Ugyanebben az utolsó 100 évben a tengervíz hőmérsékletének emelkedése utoljára 11 ezer éve volt ilyen gyors.

AMIT A KLÍMAMODELLEK TANÚSÍTANAK

Milyen természetes és antropogén okai lehetnek a változásnak?

Amint ezt korábbi tanulmányunkban (Mika J. 2019) is bemutattuk, az éghajlatot évtizedes-évszázados időskálán alakító tényezők négy csoportba sorolhatók: üvegházgázok, további antropogén tényezők (elsősorban az aeroszolok), természetes okok (vulkánosság, naptevékenység) és belső ingadozások.

Az üvegházgázok feldúsulása 1750 óta 3,82 Wm^{-2}-rel emelte a Föld–légkör rendszer energiamérlegét, amit további antropogén hatások, elsősorban az aeroszol részecskék részben (-1,10 Wm^{-2} értékkel) ellensúlyoztak. A természetes hatások és a rendszer belső ingadozásainak hatása az évszázados változásokra egy nagyságrenddel kisebb, csupán 0,1-0,2 Wm^{-2} mértékű, és nem tulajdoníthatunk nekik egyértelmű előjelet sem.

A *Jelentés* úgy fogalmaz, hogy az éghajlat ún. egyensúlyi érzékenységének legjobb becslése 3 °C, és ennek az értéknek a bizonytalansági sávja is keskenyebb lett az előző jelentés óta. **Egyensúlyi érzékenység**en azt értjük, hogy mennyivel emelkedne a felszínközeli léghőmérséklet átlaga, ha megkétszereződne a légkör szén-dioxid-tartalma, és ezen a mértéken változatlanul maradna mindaddig, amíg az éghajlat egyensúlyba kerül ezzel az új feltétellel. Tanulmányunk záró fejezetében azonban a 10. ábra azt sugallja, hogy a bizonytalanság szűkülése nem ilyen egyértelmű.

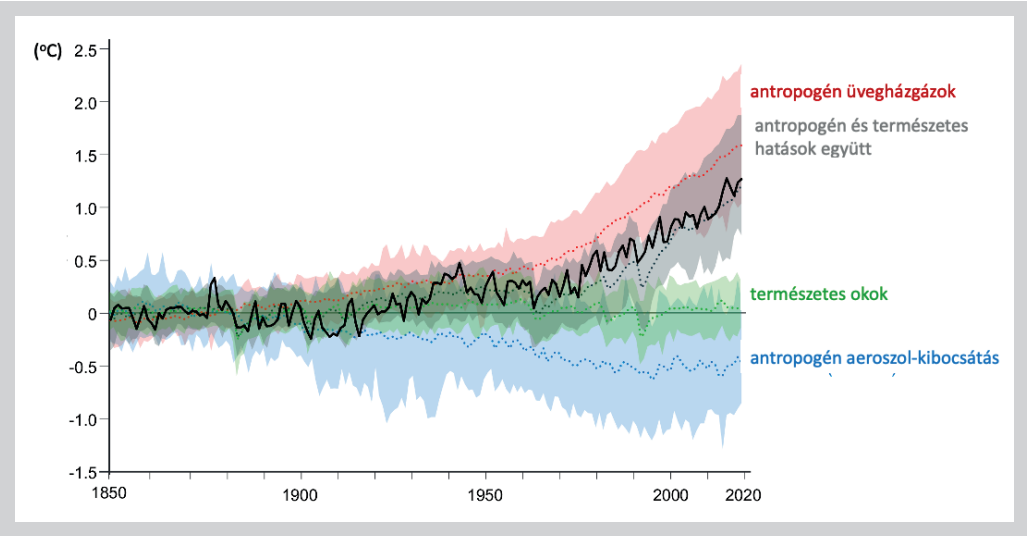
Mi bizonyítja, hogy a változásokért az emberi tevékenység a felelős?

Az emberi tevékenység meglétét, sőt meghatározó voltát továbbra is elsősorban azok a modellkísérletek szolgáltatják, amelyeket a 3. ábra összesít. Ennek lényege az, hogy a

globális átlaghőmérséklet 1850–2020 közötti alakulását jól visszaadják azok a globális klímamodellek, amelyekben minden természetes és antropogén hatást figyelembe vettek. Ez azt jelenti, hogy megfelelő az a tudás, amit a hatótényezőkről a modellekbe foglaltak, továbbá a modellek érzékenysége is megfelel a valóságosnak az éghajlati kényszerekkel szemben. Ha csak a természetes okokat és az éghajlati rendszer belső ingadozásait vonjuk be a kísérletekbe, annak – a tapasztaltakkal szemben – nagyjából állandó éghajlat lenne a következménye.

AMIT A FORGATÓKÖNYVEK ELŐREVETÍTENEK

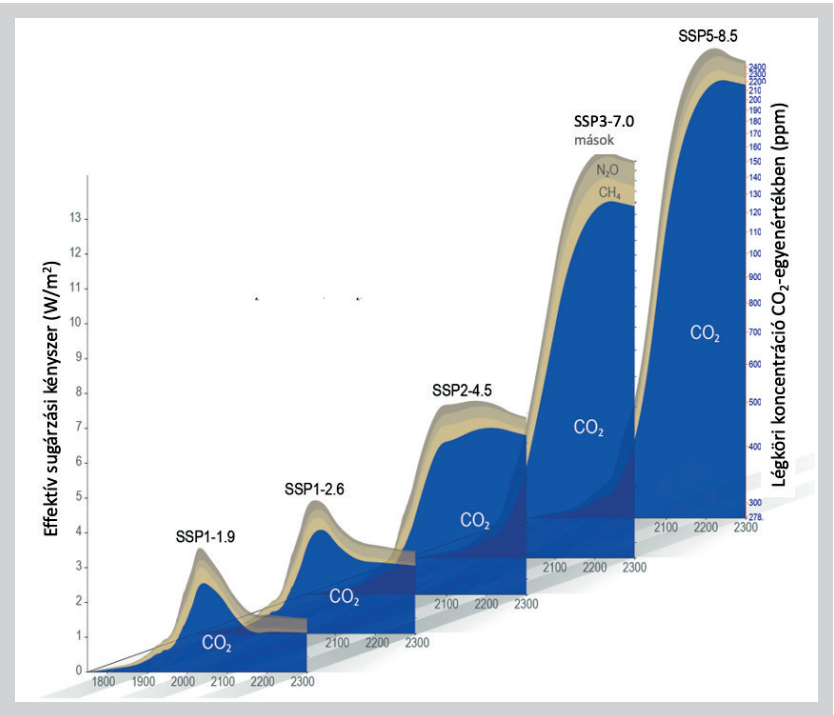
Az IPCC fennállása óta ún. **forgatókönyvek**et alkalmaz. Ezeken olyan egymáshoz kapcsolódó, logikus feltételeken alapuló feltételes előrejelzéseket értünk, amelyek egyike sem tekinthető azonban abban az értelemben előrejelzésnek, hogy a forgatókönyvek bármelyikét is valószínűbbnek tartanánk közülük, sőt annak sincs tudományos alapja, hogy ezek bármelyikét valószínűbbnek gondolnánk azoknál a változásoknál, amelyek a kiválasztott leggyorsabb, illetve leglassúbb változások közé esnek. A forgatókönyvek használatának célja az, hogy ezek szem előtt tartásával biztosítható, minden előrejelzés ugyanazokon a feltételezéseken alapuljon úgy, hogy ezek a feltételezések átfogják a belátható legoptimistább és legpesszimistább lehetőségeket.



3. ábra. A földi átlaghőmérséklet megfigyelt alakulása, valamint a különböző természetes és antropogén hatások okozta változások az 1850–2020 közötti években (Megjegyzés: a színes sávok az összes modellszimulációban 5% és 9% közötti gyakorisággal fellépő értékeket jelölik, míg a bennük futó, színes vonalak az összes modell-szimuláció átlagát ábrázolják.) (IPCC 2021 FAQ 3.1, Fig. 1)

A mostani *Jelentés* hármat megőrzött az előző jelentés négy forgatókönyve (lásd Mika J. 2019 4. ábra) közül. Ezeknek csak a nevét változtatta meg SSP (Shared Socio-economic Pathway, azaz megosztott társadalmi-gazdasági pálya) rövidítésűre, megőrizve azt a számot, ami a Föld–légkör rendszer sugárzási mérlegében 2100-ra feltételezett változást tükrözi Wm^{-2} egységben 1750-hez képest. Emellett hozzátett egy, az eredeti sorrendet a mostanival kombináló sorszámot is, így a bevezetett öt forgatókönyv jelzetei rendre SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 lettek, elhagyva a korábbi jelentés 6.0 Wm^{-2} pályáját és újként bevonva az 1.9 és 7.0 Wm^{-2} változáshoz tartozó forgatókönyveket.

A 4. ábrán bemutatjuk ennek az öt forgatókönyvnek néhány jellemzőjét. A függőleges tengelyeken balról a sugárzási mérleg változása látható 1750-től 2300-ig, míg jobbról az ekkora változást okozni képes szén-dioxid-koncentrációk láthatók (a két mennyiség között fennálló kapcsolatnak megfelelő, logaritmikus skálán). Kék színnel mindenütt a CO_2, míg sárgás és barnás színekkel a további üvegházhatású gázok szerepelnek, szén-dioxid-egyenértékben kifejezve. Az ábrán szereplő mennyiségekhez összehasonlításul érdemes megjegyezni, hogy az 1750-től csaknem a jelen időig végbement effektív változás a sugárzási mérlegben 2,7 Wm^{-2} volt.



4. ábra. A Jelentésben szereplő öt forgatókönyv fő jellemzői 1750–2300 közötti években (IPCC 2021, Fig. 1.29)

A 4. ábrán megfigyelhető, hogy a legnagyobb változást mind az öt forgatókönyvben a szén-dioxid-koncentráció kezdeti növekedése okozza, a többi üvegházhatású gáz szerepe jóval kisebb. Mind az öt forgatókönyv jelentős **szén-dioxid-koncentrációnövekedéssel** indul, de a két optimistább forgatókönyvben hamar bekövetkezik a koncentrációk stagnálása, majd csökkenése. A középső forgatókönyvben csaknem a 21. század végéig meredeken emelkedik a koncentráció, sőt mérsékeltebb ütemben ez a 22. század során is folytatódik, és csak a 23. századtól vetít előre lassú koncentráció- és sugárzási kényszerbeli csökkenést. A két legdrámaibb változást előrevetítő forgatókönyv szerint az üvegházhatás a 21. század végéig változatlan ütemben erősödik, és csak ezután indul lassú csökkenésnek.

Milyen globális éghajlatváltozás várható, lehetnek-e meglepetések?

Az előző pontban ismertetett forgatókönyvek szerint a globális átlaghőmérsékletben várható változásokat az 5. ábrán mutatjuk be, néhány más fontos globális változás kíséretében.

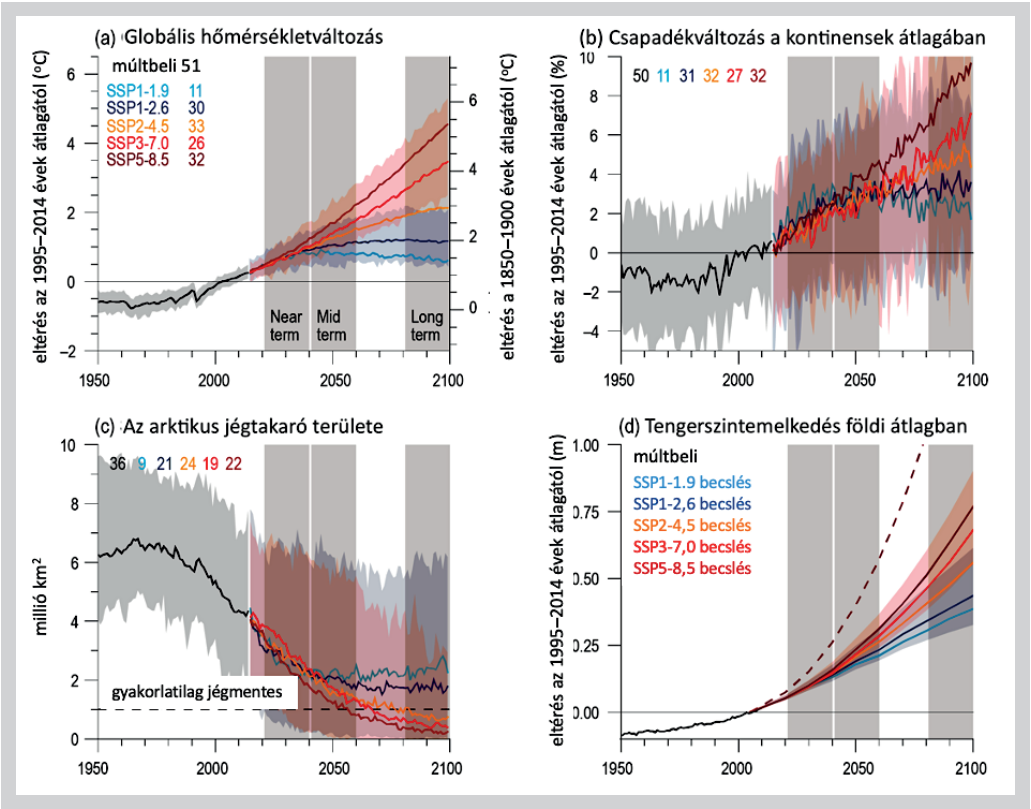
Az 5. ábra (a) része szerint a **felszínközeli átlaghőmérséklet** legalább a 21. század közepéig emelkedni fog mind az öt kibocsátási forgatókönyv szerint. Az ábra bal felső sarkában azt látjuk, hogy az egyes forgatókönyvekhez tartozó modellfuttatások közül hányban számszerűsítették az ábrán szereplő változást. A két függőleges tengely azonos léptékű, de egymástól 0,82 °C-kal eltolt osztásközöket tartalmaz, mert pontosan ennyivel volt magasabb a modellek átlagában a hőmérséklet 1995–2014-ben, mint 1850–1900-ban. A fekete vonal szerinti, múltbeli globális átlaghőmérséklet is a legfrissebb CMIP6 modellgeneráció által szimulált változások átlaga és 5–95%-os ún. konfidencia-intervalluma. Ezen itt azt értjük, hogy a megadott számú (a konkrét esetben 51 darab) becslésből csak 10% esik e sávon kívülre (5% a sáv fölé és 5% az alá).

Hacsak igen jelentős CO_2-korlátozás nem történik, akkor a **melegedés** a 21. század során meghaladja a 1,5 °C, sőt akár a 2 °C mértéket a 19. század második felének hőmérsékletéhez képest. Még a legenyhébb, SSPI-1.9 forgatókönyv szerint is igen valószínű, hogy a 21. század utolsó két évtizedének átlaga 1,0–1,8 °C-kal meghaladja az 1850–1900 közötti időszak átlagát. Ugyanezek az értékek a közepes (SSP2-4.5), illetve legmeredekebb (SSP5-8.5) forgatókönyv esetén rendre 2,1-3,5 °C-kal, illetve 3,3-5,7 °C-kal haladják meg a viszonyítási értéket.

A jelentések sorában először ez a mostani összesítette a **csapadékmennyiség**nek a kontinenseken jövőben várható alakulását, ez az 5. ábra (b) részén látható. Ebből kitűnik, hogy a melegedéssel párhuzamosan emelkedett, és a jövőben is emelkedni fog az összes kontinensre és a teljes évre összegzett csapadék mennyisége. Amint ez az ábráról kiolvasható, az öt különböző forgatókönyv szerint 2100-ra a csapadéktöbblet 2% és 10% között

várható, és annál nagyobb mértékű, minél meredekebben erősödő üvegházhatást feltételezünk. Megjegyezzük, hogy ezen belül számos szárazföldi térségben csökkent, illetve csökkenni fog a csapadék mennyisége (lásd később a 6. és 7. ábrán). Minden bizonnyal ez volt az oka annak is, hogy a korábbi jelentések nem közölték az összes kontinens fölött összegzett csapadék változásait.

Az 5. ábra (c) része az északi félgömb **tengeri jégtakaró**jának legkisebb – szeptemberi – kiterjedésének a globális modellekben szimulált alakulását mutatja be. Megfigyelhető, hogy nemcsak a két leggyorsabb melegedést előidéző forgatókönyv, hanem még a közepes (SSP2-4.5) szcenárió szerint is századunk végére a Jeges-tenger gyakorlatilag jégmentes lesz a legkisebb éven belüli kiterjedésében. Csak a két optimista forgatókönyv szerint áll le a csökkenés, és marad állandó kb. 2050 után az északi félgömb tengeri jégtakarójának kiterjedése.



5. ábra. Néhány – a klímamodellekben szimulált – globális mutató alakulása az öt választott forgatókönyvre külön-külön átlagolva. A 2014 előtti görbék is klímamodellekben szimulált változások. A színes feliratok utáni számok azt mutatják, hogy hány modell felhasználásával készült az átlagolás. (Megjegyzés: a függőleges szürke oszlopok a Jelentés néhány fejezetében kiemelten kezelt időszakokat jelölik.) (IPCC 2021, Fig. 4.2)

Végül az 5. ábra (d) része azt mutatja meg, hogy miként alakul majd a **világóceán szintje**. Szigorúan véve az általános cirkulációs modellekben csak a tengervíz hőtágulásával kapcsolatos szintemelkedés számolható ki, ezért a szárazföldi jégtakaró olvadását más, kellően hosszan (évszázadokig) futtatható modellekből utólag adták hozzá a hőtágulásból származó változásokhoz. A satírozott sávok az SSP1-2.6 és az SSP3-7.0 forgatókönyvekkel végzett számítások 5-95%-os intervallumai, míg a legerősebb változást mutató szaggatott vonal az SSP5-8.5 szerinti hőtágulás legmagasabb értékéhez adott, kis valószínűségű, kiugróan bizonytalan szárazföldi jégolvadással kísért forgatókönyv, amely görbe megvalósulása a 2100-as évben 1,7 m-rel megemelt tengerszintet jelentene.

További néhány globális mutató alakulásáról – immár illusztrációk nélkül – a következőket mondhatjuk. Minden bizonnyal tovább melegszenek az óceánok felső rétegei, ami stabilabbá, azaz függőlegesen kevésbé átkeveredővé teszi az óceánokat. A melegedés felülről lefelé terjedése azt is eredményezi, hogy a hőtágulás még évszázadokkal az után is folytatódik majd, hogy a levegő hőmérséklete – remélhetően – már stagnál, sőt csökken. Ez az elhúzódó tengerszint-emelkedés alighanem a globális felmelegedés legveszélyesebb és mindenütt egyformán káros következménye. A tengervíz szintjének emelkedését a *Jelentés* a legenyhébb forgatókönyv esetén is 0,28-0,55 m-re várja 2100-ra (az 1995–2014 közötti évekhez képest). A közepes forgatókönyv szerint ez a változás 0,44-0,76 m, míg a legmeredekebb forgatókönyv szerint már 0,63-1,01 m közötti lehet az emelkedés.

Tovább emelkedik az **óceánok savtartalma** a bekerülő szén-dioxid hatására, ugyanakkor megjegyezzük, hogy az óceánok kémhatása jelenleg enyhén lúgos (pH-ja 8,1-8,2) és az is marad, bár a néhány tizeddel csökkenő pH-ja okán kevésbé lúgossá alakul.

Az északi félgömb **szezonális hótakarójá**nak a kiterjedése is jelentősen csökken a globális melegedés fokozódásának következményeként. Az Antarktisz körüli tengeri jégtakaró tendenciája nem egyértelmű. Ennek okát a *Jelentés* abban látja, hogy az egyes térségekben a változások eltérő előjelűek. Ugyanakkor ha a változásokat mégis átlagoljuk, akkor több évtizednyi magyarázat nélkül álló kiterjedés-növekedés után a 2010-es évek közepétől megindult a tengeri jégtakaró visszahúzódása.

Várhatóan **tovább olvadnak a hegyvidéki gleccserek és a szárazföldi jéghátságok**. Az örökké fagyott (permafroszt) területek is tovább fogynak majd, ami sajátos belső mechanizmusként erősítheti a felmelegedést. Ennek a pozitív visszacsatolásnak a lényege a következő: ha bármilyen okból melegszik a Föld, akkor egyre újabb területeket érint az olvadás, és az olvadó területek alól robbanásra emlékeztető hanghatással tör elő az évmilliók óta bezárt metánhidrát, ami a légkörben azonnal metánná alakulva erősíti a melegedést. A grönlandi és az antarktiszi jég is várhatóan tovább olvad majd, de e változások mértéke – a forgatókönyvek közötti különbségek nélkül is – meglehetősen bizonytalan. Emiatt a kis valószínűségű, de drámai hatások bekövetkezése továbbra

sem zárható ki. A szárazföldi jég olvadását is figyelembe vevő számítás szerint a következő kétezer évben a tengerszint emelkedése 2 és 3 m között marad, amennyiben sikerül csupán 1,5 °C-kal magasabb szinten korlátozni a melegedést. Ha ez csak 2 °C-on sikerül (ne feledjük, hogy ebből 1 °C már bekövetkezett), akkor az emelkedés 2 és 6 m közé eshet. Az elrettentő példa az a 19-22 m-es emelkedés, amit a számítások arra az esetre mondanak, ha a melegedés elérné az 5 °C-ot. E számításokat megerősítik a 125 ezer évvel, illetve 3 millió évvel ezelőtti paleoklímákban rekonstruált mértékek is.

A múltban történt, illetve folytatódó melegedés hatására bekövetkező változások visszafordíthatatlanok lehetnek a következő évszázadok és évezredek során, különösen az óceánokban, a jéghátságokban és a tengervíz szintjében.

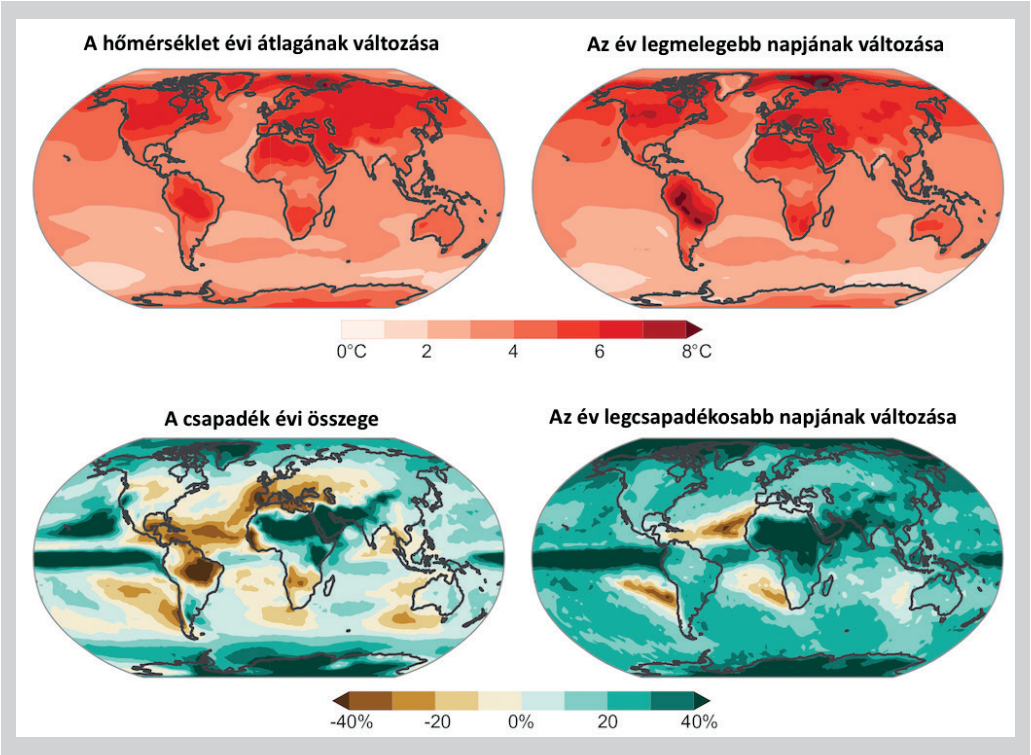
Hogyan alakulnak a regionális változások és a szélsőségek?

A kontinensek fölötti léghőmérséklet 1,4-1,7-szer gyorsabban emelkedik, mint az óceánok fölött. Az északi félgömb sarkvidéki területeinek melegedése kétszeresen meghaladja a globális átlaghőmérséklet emelkedését.

A 6. ábrán együtt mutatjuk a hőmérséklet és a csapadék átlagainak és szélsőségeinek várható változását. Az előbbin az évi középhőmérséklet, illetve az éves csapadékösszeg változásait, míg a szélsőséges hőmérsékleten az év legmagasabb napi középhőmérsékletét, illetve az év legmagasabb napi csapadékösszegét értjük. Megfigyelhető, hogy amíg a hőmérséklet átlagának és szélsőséges értékének a változása hasonló területi eloszlású, addig a csapadék két fenti mutatója egész más területi eloszlást mutat. A hőmérséklet mindkét mutatója erősebben változik a kontinensek fölött, míg a csapadékátlagok markáns területi struktúrát mutató változásával szemben a napi maximális csapadék szinte az összes kontinens fölött erősödik és csak néhány kisebb óceáni terület fölött csökken.

Azok a szélsőségek, amelyek erősödnek a globális felmelegedéssel, annál gyorsabban szaporodnak és erősödnek, minél gyorsabb és jelentősebb mértékű a melegedés. Ilyen változás a forró szélsőségek fokozódása és gyakoribbá válása, a rövid idő alatt lehulló heves esők, illetve egyes térségekben az aszályok. A heves esőzések vízhozama minden 1 °C globális melegedésre 7% vízhozam-növekedéssel reagál, szoros összefüggésben azzal, hogy a melegedés hatására bizonyítottan megnő a légkör vízgőztartalma. A globális melegedés erősödésével fokozódik az intenzív (4-es, 5-ös fokozatú) trópusi ciklonok fellépésének aránya, valamint a bennük jelentkező maximális szélsebesség mértéke is.

Nagy valószínűséggel megnő az alacsony földrajzi szélességeken az El Niño és La Niña állapotokhoz tartozó csapadékingadozás, illetve az ehhez kapcsolódó ún. déli oszcilláció erőssége, különösen a közepes és a gyors globális klímaváltozást előrejelző forgatókönyvek



6. ábra. A felszínközeli hőmérséklet (felső sor, °C) és a csapadék (alsó sor, a kiinduló érték százaléka) átlagértékeiben (balra), illetve szélsőségeiben (jobbra) várható változások területi eloszlása. A hőmérséklet szélsősége az év legmagasabb hőmérsékletének változását, míg a csapadék szélsősége az év legnagyobb napi csapadékösszegének változását mutatja (IPCC 2021 FAQ 11.1, Fig. 1)

szerint. Ez a 2-7 évente szabálytalan gyakorisággal és amplitúdóval fellépő ingadozás, amelynek során az előbbi fázisban több fokkal melegebb, az utóbbiban ennél valamivel kisebb mértékben, de hűvösebb a Csendes-óceán trópusi területének felszínhőmérséklete, több hónapig csapadékossá, illetve aszályossá tesz hatalmas, fél kontinensnyi területeket. Ennek az ingadozásnak az erősödése a trópusi és a szubtrópusi vidékek fejlődő országaira nézve a globális felemelegedésnek igen kellemetlen következménye.

Milyen globális következmények várhatók?

Korábbi tanulmányunkban (Mika J. 2019) ezen a fejezetcímen a tengerszintre gyakorolt hatást, az éghajlatváltozás és a menekültek kapcsolódását, a növényzetre és a városok éghajlatára, valamint az emberi egészségre gyakorolt hatást mutattuk be. Mivel a tengerszintre gyakorolt hatásról az előző pontban már szóltunk, a további hatások jellemzően

az IPCC Hatodik jelentése második kötetének (Hatások, alkalmazkodás, sérülékenység; IPCC 2022a) a témája, ebben a fejezetben nem teszünk további összehasonlítást.

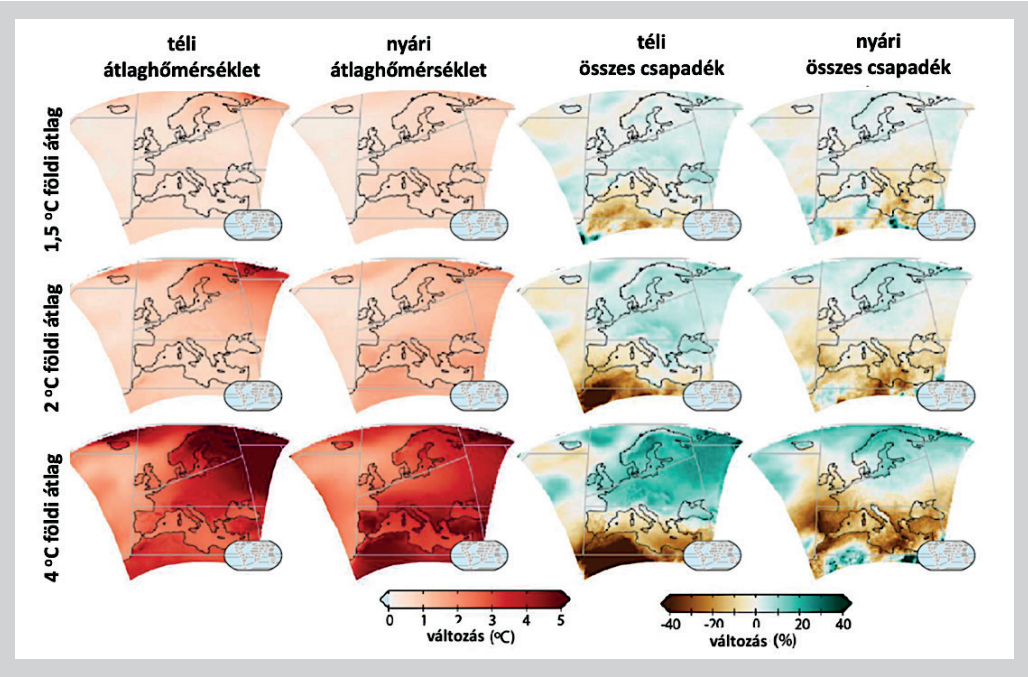
Hogyan alakul az éghajlatváltozás és milyen következményei lehetnek hazánkban?

Jelen tanulmányunk csak az IPCC legújabb tudományos eredményeit kívánja hozzátenni a korábbi cikkünkhöz (MIKA J. 2019), ezért nem térünk ki minden ott tárgyalt eredményre. Pontosabban, egyetlen kutatási eszköz – a globális klímamodellekbe ágyazott regionális modellek – által nyert eredményeket mutatjuk be nagyszámú ilyen modell eredményei alapján.

A 7. ábra a téli és a nyári **hőmérséklet-**, illetve **csapadékváltozásokat** ábrázolja Európára nézve. Az eredmények az 1995–2014-es referenciaidőszakhoz képest a 2, illetve 4 °C-kal magasabb földi átlaghőmérsékletű állapotokhoz tartozó változásokat összesítik, mégpedig a leggyorsabb változást feltételező SSP5-8.5 forgatókönyvet követve. Ezek a térképek tehát nem csupán grafikus nagyításai a globális modellek eredményeit kirajzoló térképeknek (mint amilyeneket a 6. ábra bal oldalán láthattunk), hanem a beágyazott regionális modellek sokkal finomabb térbeli felbontásának köszönhetően a kisebb térbeli folyamatok fizikai leírására is alkalmasabb eszközök eredményei, ami különösen a csapadék vonatkozásában ígér sokkal reálisabb eredményeket a globális modelleknél.

Ha elsőként a melegedés két különböző mértékéhez tartozó ábrákat (tehát pl. az első és a második sor 4-4 ábráját) páronként összehasonlítjuk, akkor azt látjuk, hogy az adott páros mindkét ábráján ugyanazok a kontinensrészek mutatják a legnagyobb változást a hőmérsékletben, és hasonló a csapadékosabbá, illetve szárazabbá váló térségek területi eloszlása, csak mindenütt markánsabbak a 4 °C-os globális melegedéshez tartozó változások. Ugyanakkor a két szélső évszak változásmezői már különböznek egymástól, sőt ezek a különbségek a két vizsgált meteorológiai elemre nézve sem azonosak. A hőmérséklet emelkedése télen Európa leghidegebb északi, északkeleti szektorában a legnagyobb mértékű, míg nyáron Kelet-Európa mellett a mediterrán térség is jelentősebb melegedést mutat. Hazánk térségében mindkét évszakban nagyjából a globális átlaggal azonos mértékű a melegedés.

A csapadék téli és nyári változási mezői első látásra eltérőnek tűnnek, de felfedezhetjük benne a csapadékosabbá, illetve szárazabbá váló területeket jellemző, északkelet–délnyugati irányú dipólus eltolódását is a két évszak között. Ha így nézzük, akkor az évszakos csapadékösszeg nulla változásának vonala télen kb. a 40° északi szélességre esik, míg télen inkább az 55° északi szélességre. Ettől délre és délnyugatra csapadékcsökkenés, északra és északkeletre csapadéknövekedés várható Európában. Ennek megfelelően hazánkban télen egyértelmű csapadéknövekedés, míg nyáron csapadékcsökkenés várható.



*7. ábra. A hőmérséklet és a csapadék téli, illetve nyári átlagainak és összegeinek alakulása Európában, összesen 40 kapcsolt globális + regionális klímamodell számításaiból átlagolva. Minden számítás az SSP5-8.5 forgatókönyvet követte, és azt az évet vette figyelembe, amikor az adott modell átlaghőmérsékletének változása elérte a 2, illetve 4 °C-t az 1995–2014 évek átlagához viszonyítva. (*IPCC 2021, Regional Factsheet – Europe *részlet)*

AMIT TENNÜNK KELL AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁSSAL KAPCSOLATBAN

Van-e remény a változások csökkentésére, és mit kell tenni ezért?

Noha a klímaváltozás mérséklésének módozataival részletesen a *Jelentés* harmadik kötete (IPCC 2022b) foglalkozik, a koncentrációk és az éghajlat alakulása, illetve a releváns szennyezők összegzett kibocsátása és a klímaváltozás mértéke között kiszámítható kapcsolatokkal az első kötet (IPCC 2021) is foglalkozik. Elemzi a *Jelentés* azt is, hogy az üvegházgázok és az aeroszol-szennyezés visszafogása mennyire segíti a levegőminőség javítását.

Megerősíti a *Jelentés* annak a közel lineáris kapcsolatnak a fennállását, ami a szén-dioxid gáz összes kibocsátása és a hőmérsékletváltozás között fennáll. Eszerint minden 1000 gigatonna CO_2 kibocsátása 0,45±0,18 °C-kal emeli a Föld átlaghőmérsékletét. Ez a bizonytalansági sáv szűkebb, mint a korábbi IPCC-dokumentumok becslése. Ez a

mutató egyben azt is jelzi, hogy el kell érni a nulla nettó kibocsátást ahhoz, hogy ne emelkedjen tovább a hőmérséklet, vagyis csak akkora lehet a kibocsátás, mint amennyit a bioszféra és az óceánok el tudnak nyelni.

Bonyolítja a helyzetet, hogy nincs semmilyen garancia arra, hogy az elnyelés magasabb kibocsátások esetén is biztosítja azt a kb. 30%-ot, ami a jelenlegi elnyelés. Megközelíthetjük ezt a kérdést úgy is, hogy továbbra is elnyelnek-e 56%-ot a fenti szférák ahhoz, hogy a mindenkori CO_2-kibocsátásnak csupán 44%-a kerüljön a levegőbe.

Felmerül az a kérdés is, mit ígér a *Párizsi klímamegállapodás* és mire elég ez? Vannak-e olyan geomérnöki megoldások, amikkel tovább enyhíthető a melegedés? Korábbi tanulmányunk e két pontjára nézve a most bemutatott *Jelentés* nem tartalmaz új elemet, azok témájuk szerint a *Jelentés* harmadik kötetéhez tartoznak. A most ismertetett kötetben sem a „Párizs", sem a „geomérnök" szó nem szerepel (a szövegkereső tanúsága szerint).

Mit jelent az alkalmazkodás és mikor kell hozzákezdeni?

Az **éghajlatváltozáshoz történő alkalmazkodás** lényege, hogy jó előre tudva, mi várható, igyekszünk olyan lépéseket tenni, amelyekkel csökkenthetjük a változásból fakadó hátrányokat, és kihasználhatjuk az ebből származó előnyöket. Az e fejezet címében feltett kérdés második feléhez logikus lenne azt válaszolni, hogy minél hamarabb, annál jobb, de van két körülmény, ami ennél bonyolultabbá teszi a választ. Az egyik az, hogy minden intézkedés végrehajtható egy bizonyos időn belül, ugyanakkor az éghajlatváltozás előrejelzése viszont korlátozott bizonyosságú. Például egy új, aszálytűrő fajta kinemesítése, ugyanígy egy záportározó vízmű megépítése 10-20 év alatt valósítható meg, ezért ezekhez nem érdemes sokkal hamarabb hozzákezdeni, hiszen a köztes időben tisztázódhatnak a klímaváltozással kapcsolatos tudományos kérdések.

A másik, főként ebben a mostani *Jelentés*ben felismert szempont az, hogy az éghajlat lassú, tendenciaszerű változásait lassíthatják, vagy éppenséggel gyorsíthatják olyan évtizedes ingadozások, mint amilyen (az IPCC szerint) 1998–2012 között bekövetkezett lassulás, korábbi nevén **globális melegedési hiány**. Márpedig ha ilyen egy-két évtizedes eltérések lehetnek a várt globális melegedéshez képest, az megnehezíti a sikeres alkalmazkodást, mivel így kevésbé tudjuk, hogy mihez kellene alkalmazkodnunk.

Megjegyezzük, hogy korábbi írásunkban ezt az időszakot 2002–2013 közé tettük, mert az időszak eleje betudható az „évszázad El Niño jelenségének", ami után a globális átlaghőmérséklet még visszatért a megelőző évek trendjéhez, illetve a 2013. év átlaghőmérséklete még nem vett fel kiugró értéket. További megjegyzés, hogy a levegő melegedése annak ellenére stagnált, hogy a teljes éghajlati rendszer hőfelvétele változatlanul folytatódott, csak másképp oszlott meg a légkör és a lassúbb komponensek, elsősorban

az óceán mélyebb rétegei között. Megjegyezzük továbbá azt is, hogy a mostani *Jelentés* először veti fel ilyen ingadozások lehetőségét, ugyanakkor nem tisztázza, hogy a legutóbbi ingásnak mik voltak az okai, és arra sem tér ki, hogy a múltban milyen gyakran léptek fel ilyen ingások, azaz milyen gyakran számíthatunk ilyenekre a jövőben is.

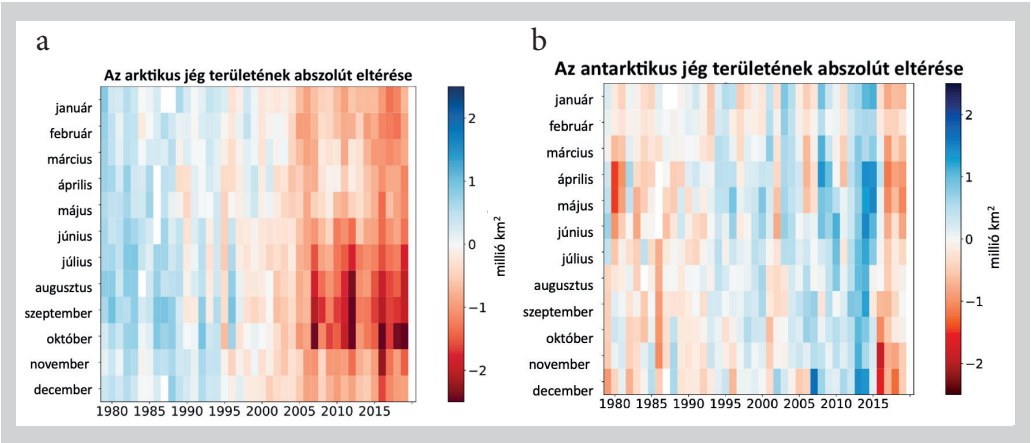
Végül megjegyezzük, hogy a *Jelentés* foglalkozik olyan, kis valószínűségű, de bekövetkezésük esetén nagyon veszélyes folyamatokkal, amelyek ma még a tudomány számára nem előrejelezhetők. Ilyen például az **óceáni szállítószalag** jelensége, ami biztosítja, hogy a hőmérséklet sokkal egyenletesebben oszoljon meg a földrajzi szélességek között annál, mintha csak a lokális energiamérleg vezérelné azt. Ez a szállítószalag nagy valószínűséggel tovább gyengül majd a 21. század folyamán, bármelyik kibocsátási forgatókönyvet vesszük is alapul. Azt azonban ma még csak közepes biztonsággal állíthatjuk, hogy milyen mértékű lesz majd ez a gyengítés. Ha bekövetkezne, a szállítószalag teljes leállása dél felé tolná el a trópusi esőerdő övét, gyengítené az afrikai és az ázsiai monszunt, és szárazabbá tenné Európát.

NÉHÁNY TUDOMÁNYOS KIHÍVÁS…

Amint ezt az előző fejezetekben érzékeltettük, számos eredmény és következtetés arra utal, hogy az új jelentés tovább erősítette azt a konszenzusos álláspontot, miszerint a tapasztalható éghajlatváltozás minden bizonnyal emberi eredetű, és jelentős változásokat okozhat a jövőben is. Ugyanakkor ebben a fejezetben szeretnénk felhívni a figyelmet arra, hogy vannak olyan részletkérdések, amelyekre még adós a tudomány a megnyugtató válaszokkal. E problémák közül mutatunk be hármat, amelyek jobb megértése megerősítené más állítások igazolását, illetve a kétségek esetleges további fokozódása okot adhat más következtetések megkérdőjelezésére.

Elsőként tekintsünk a 8. ábrára, amelyen balról az északi, míg jobbról a déli félgömb **tengeri jégtakaró**jának kiterjedését láthatjuk az év minden hónapjában. Az Arktisz tengeri jégtakarója a műholdakról jól megfigyelhető, az 1970-es évek közepe óta lényegében egyenletesen csökken. Ugyanakkor az Antarktiszt körbevevő tengeri jég kiterjedése a globális melegedés ellenére 2015-ig emelkedett, viszont ezt követően váratlan fordulattal csökkenni kezdett. Sem a korábbi növekedést, sem az azóta látható csökkenést nem tudjuk kielégítően magyarázni. A *Jelentés* döntéshozói összefoglalója (IPCC 2021) ezen a hiányosságon úgy próbál úrrá lenni, hogy a regionális különbségekre és az adatok nem kellő megbízhatóságára hivatkozva a kiterjedésnek sem a korábbi növekedését, sem a későbbi csökkenését nem tartja megbízhatónak.

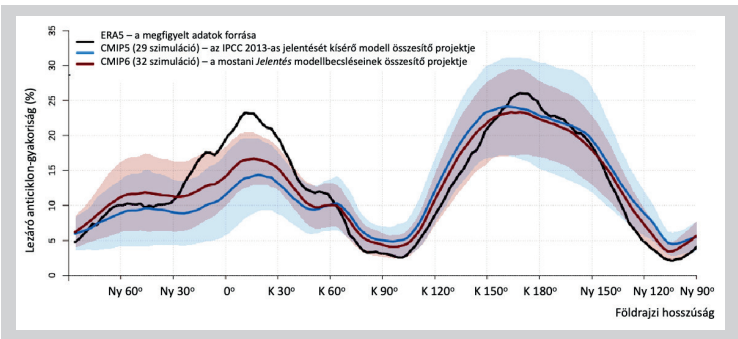
A déli félgömb tengeri jégtakarója összefüggheet azzal, hogy a korábban jelzett (Mika J. 2019) globális melegedési hiány közvetlen oka a déli félgömbi mélyóceánok erősödő



8. ábra. A tengeri jégtakaró kiterjedése az északi (a) és a déli (b) félgömbön, műholdas megfigyelések alapján, az 1979–2008 közötti időszak átlagához viszonyítva (IPCC 2021, Fig. 9.13 és 9.15 ábrák részlete)

hőelnyelése lehetett. Ha ezt az állítást kapcsolni lehetne a déli félgömb tengeri jégtakarójának csökkenéséhez, mint a hőelvonás további következményéhez, akkor közelebb jutnánk az adott időszak lassú légköri változásai folyamatának megértéséhez, és talán ahhoz is, hogy megtudjuk, milyen gyakran kísérheti a tapasztalthoz hasonló hőmérséklet-visszaesés, átmenetileg fékezve az egyenletes melegedést.

A következő tudományos kihívás abban áll, hogy a jelenlegi éghajlati modellek még mindig nem képesek pontosan megjeleníteni a légkör legnagyobb kiterjedésű képződményeit, az ún. **lezáró anticiklonokat** sem. A 9. ábra folytonos fekete vonala az objektív kritériumok szerint azonosított, megfigyelt gyakoriságot mutatja, míg a piros és a kék vonal a mostani (CMIP6), illetve az eggyel korábbi (CMIP5) jelentéseket megalapozó

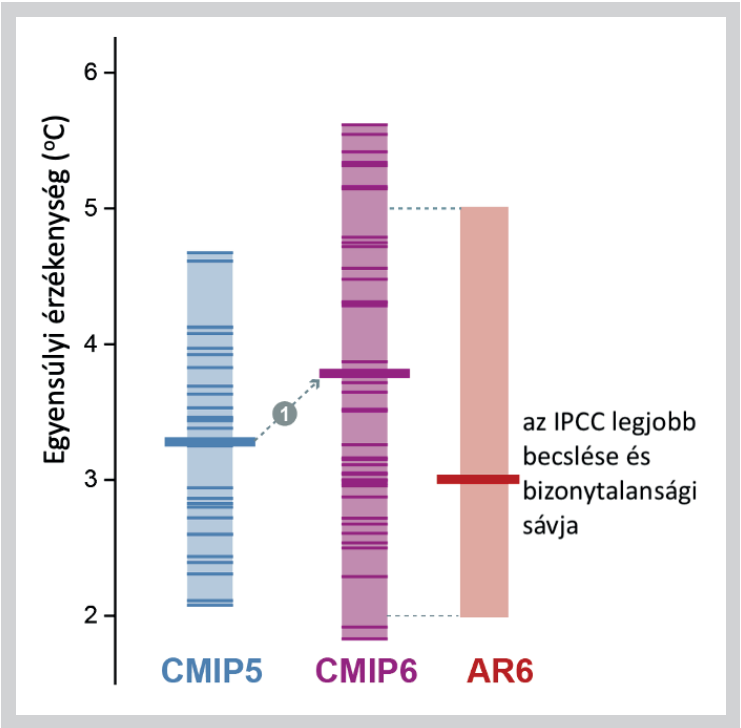


9. ábra. Az esetenként hetekig változatlan helyzetű ún. lezáró („blocking”) anticiklonok megfigyelt (ERA5), illetve klímamodellek által szimulált (CMIP5 és CMIP6) gyakorisága a földrajzi hosszúság függvényében az északi félgömb mérsékelt földrajzi szélességein, a decembertől februárig terjedő négy hónapban, 1979–2000 között (IPCC 2021, Fig. 3.18)

globális klímamodellek által az adott földrajzi hosszúságra szimulált lezáró anticiklonok százalékos gyakoriságát ábrázolja.

Bár a legutóbbi modellek jobban megközelítik a tényleges gyakoriságokat, mint a korábbi szimulációk átlaga, de az eltérés épp a 20° keleti hosszúság térségében a legnagyobb: itt a szimulált gyakoriság mintegy egyharmadával kevesebb a tényleges gyakoriság. Ezzel az alulbecsléssel szemben az eurázsiai kontinenst inkább túlbecslés jellemzi. Márpedig ha nem igazán jó az általános légkörzés legnagyobb kiterjedésű és leghosszabb élettartamú, tehát elvben leginkább szimulálható jelenségeinek szimulációja, akkor mennyire bízhatunk meg a cirkuláció kisebb léptékű és rövidebb élettartartamú jelenségeinek előrevetített megváltozásában?

Végül a 10. ábrán az éghajlat ún. **egyensúlyi érzékenységét** számszerűsítő becslések összesítését látjuk, aminek lényege, hogy bár az újabb *Jelentés*hez futtatott globális klímamodellek az előzőnél valamivel erősebb (kb. 3,8 °C-os) átlagos változást mutatnak, az összes modell válaszát átfogó minta terjedelme sokkal szélesebb, mint a korábbi



10. ábra. A felszínközeli léghőmérséklet ún. egyensúlyi érzékenysége (°C) a légköri CO_2-koncentráció megkétszereződése esetén. Az (1) jelzet a CMIP5 és CMIP6 modellgenerációk átlagos becslései közötti eltérés (IPCC 2021 FAQ 7.3, Fig. 1 részlete)

modell-válaszoké. Az IPCC legjobb becslését viszont azért kellett 3 °C-ra csökkenteni, mert a múltbeli változások magyarázatát célzó empirikus vizsgálatok ekkora, vagy valamivel kisebb egyensúlyi érzékenységre engedtek következtetni. Az tehát igaz lehet, hogy az éghajlat egyensúlyi érzékenysége nem nagyobb, mint 3 °C, de azt kétségbe kell vonnunk, hogy ebben az értékben bizonyosabbak lettünk a korábbi Jelentés óta.

KÖVETKEZTETÉSEK

A fentiekben hosszan tárgyaltuk az IPCC legújabb tudományos *Jelentés*ének (2021) tartalmát. Adósak vagyunk még annak a kérdésnek az egyértelmű megválaszolásával, miként értékelhető a *Jelentés* abból a szempontból, biztosabbak lehetünk-e abban, hogy az éghajlatváltozás olyan kihívás, ami azonnali beavatkozást igényel annak érdekében, hogy évtizedek múlva ne legyen fájdalmasan gyors a változás, és ne találjanak minket felkészületlenül a változás hatásai? Illetve mit tarthatunk meg, és mit kell másképp értékelnünk az előző jelentés alapján készült korábbi tanulmányunkból (Mika J. 2019)?

Összesítve az eredményeket, úgy véljük, hogy az elmúlt 8 év megfigyelései és modellszámításai fokozták abbéli meggyőződésünket, hogy az **antropogén hatások valós veszélyt jelentenek**. Tovább folytatódott ugyanis a változás, mégpedig a várt irányokban. Emellett nem csökkent, sőt kissé emelkedett az előrejelzések szerint a jövőben várható globális eltolódás. Ugyanakkor az új *Jelentés* **sem támasztja alá az emberiség jövőjét megpecsételő, pár évtizeden belül elkerülhetetlenné váló gyors éghajlati katasztrófák vízióját**.

IRODALOM

Mika János (2019): Az éghajlatváltozásról 12 fejezetben. – GeoMetodika 3. 1. pp. 5–25. DOI: https://doi.org/10.26888/GEOMET.2018.3.1.1

IPCC 2013: Stocker, T. F. – Qin, D. – Plattner, G.-K. – Tignor, M. – Allen, S. K. – Boschung, J. – Nauels, A. – Xia, Y. – Bex, V. – Midgley, P. M. (szerk.): Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge – New York. 1535 p.

IPCC 2021: Masson-Delmotte, V. – Zhai, P. – Pirani, A. – Connors, S. L. – Péan, C. – Berger, S. – Caud, N. – Chen, Y. – Goldfarb, L. – Gomis, M. I. – Huang, M. – Leitzell, K. – Lonnoy, E. – Matthews, J. B. R. – Maycock, T. K. – Waterfield, T. – Yelekçi, O. – Yu, R. – Zhou, B. (szerk.): Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge – New York. Megjelenés alatt. DOI: https://doi.org/10.26888/10.1017/9781009157896

IPCC 2022a: Pörtner, H-O. – Roberts, D. C. – Tignor, M. – Poloczanska, E. S. – Mintenbeck, K. – Alegría, A. – Craig, M. – Langsdorf, S. – Löschke, S. – Möller, V. – Okem, A. – Rama,

B. (szerk.): Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press. Cambridge – New York. 3056 p. DOI: https://doi.org/10.26888/10.1017/9781009325844

IPCC 2022b: Shukla, P. R. – Skea, J. – Slade, R. – Al Khourdajie, A. – Van Diemen, R. – Mccollum, D. – Pathak, M. – Some, S. – Vyas, P. – Fradera, R. – Belkacemi, M. – Hasija, A. – Lisboa, G. – Luz, S. – Malley, S. (szerk.): Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge – New York. DOI: https://doi.org/10.26888/10.1017/9781009157926