Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata

Az USA energiaügyi minisztere számára amerikai klímakutatók által a klímaváltozás „oktulajdonításáról” készített jelentés magyar fordítása

Bevezető a magyar változathoz

Az Amerikai Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) 2025. július 23-án közzétette öt neves kutató jelentését az energetikai zöldátállás klímaváltozással való megokolásának értékeléséről. A mű bibliogáfiai adatai: Climate Working Group, 2025: A Critical Review of Impacts of Greenhouse Gas Emissions on the U.S. Climate. Washington DC: Department of Energy, July 23, 2025; elérhetősége: https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-07/DOE_Critical_Review_of_Impacts_of_GHG_Emissions_on_the_US_Climate_July_2025.pdf.

A szerzők (John Christy, Judith Curry, Steven Koonin, Ross McKitrick, Roy Spencer) szisztematikusan sorra veszik a valóban tudományos megállapítások és a fősodratú klímapolitikai jelszavak közötti ellentmondásokat. E módszerrel úgy szedik ízekre a klímadogmát, hogy a CO_2 éghajlati szerepének tudományos alapjait még csak meg sem kérdőjelezik.

A vitaindító dokumentum globális jelentőségét felismerve a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoportja a jelentésről először rövid összefoglalót készített (megjelent: Demokrata, 2025. augusztus 6.), most pedig bemutatjuk magyar nyelven a mintegy 150 oldalas dokumentum teljes szövegét.

Címoldal:

Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó hatásainak kritikai felülvizsgálata

Jelentés Christopher Wright amerikai energiaügyi miniszter számára

2025. július 23.

Klímaváltozási Munkacsoport:

John Christy, PhD

Judith Curry, PhD

Steven Koonin, PhD

Ross McKitrick, PhD

Roy Spencer, PhD

Ezt a jelentést az Energiaügyi Minisztérium terjeszti. Mint ilyen, e dokumentum a 2001-es költségvetési évre vonatkozó kincstári és általános kormányzati előirányzatokról szóló törvény (106-554. számú közjog) 515. szakaszának és az Energiaügyi Minisztérium által kiadott információminőségi irányelveknek megfelelően készült.

Copyright © 2025 Egyesült Államok

Javasolt hivatkozás:

Klímaváltozási Munkacsoport (2025): Az üvegházgáz-kibocsátás USA-ra vonatkozó éghajlati hatásainak kritikai felülvizsgálata. Washington DC: Energiaügyi Minisztérium, 2025. július 23.

A Jelentés tartalomjegyzéke:

MINISZTERI ELŐSZÓ

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

BEVEZETŐ

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐANYAG

2 A CO_2 KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

2.1 A CO_2, MINT A GLOBÁLIS ZÖLDÜLÉSHEZ HOZZÁJÁRULÓ TÉNYEZŐ

2.1.1 A globális zöldülés mérése

2.1.2 Fotoszintézis és CO_2-szint

2.1.3 Növekvő CO_2- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

2.1.4 A CO_2-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

2.2 A LÚGOS ÓCEÁNOK

2.2.1 A pH változása

2.2.2 Korallzátony-változások

3 AZ EMBER HATÁSA AZ ÉGHAJLATRA

3.1 A SUGÁRZÁSI KÉNYSZER ÖSSZETEVŐI ÉS TÖRTÉNETÜK

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

3.1.2 A légköri CO_2-szint változása 1958 óta

3.2 JÖVŐBENI KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYVEK ÉS A SZÉNCIKLUS

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

3.2.2 A kibocsátásokhoz és koncentrációkhoz kapcsolódó szénciklus

3.3 AZ URBANIZÁCIÓ HATÁSA A HŐMÉRSÉKLETI TRENDRE

II. RÉSZ: A CO_2-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO_2-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

4.1 BEVEZETÉS

4.2 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG MODELLALAPÚ BECSLÉSE

4.3 A KLÍMAÉRZÉKENYSÉG ADATALAPÚ BECSLÉSE

4.4 TRANZIENS KLÍMAÉRZÉKENYSÉG

5 ELTÉRÉSEK A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

5.1 BEVEZETÉS

5.2 FELSZÍNI MELEGEDÉS

5.3 TROPOSZFÉRIKUS MELEGEDÉS

5.4 ELTÉRÉSEK A FÜGGŐLEGES HŐMÉRSÉKLET-PROFIL MENTÉN

5.5 SZTRATOSZFÉRIKUS HŰLÉS

5.6 ELTÉRÉSEK A HÓTAKARÓBAN

5.7 A PLANETÁRIS ALBEDÓ FÉLGÖMBI SZIMMETRIÁJA

5.8 AZ USA KUKORICAÖVEZETE

6. SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

6.1 BEVEZETÉS

6.2 HURRIKÁNOK ÉS TRÓPUSI CIKLONOK

6.3 HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

6.3.2 Hőküszöb-túllépések

6.3.3 Hőhullámok

6.4 SZÉLSŐSÉGES CSAPADÉK

6.5 TORNÁDÓK

6.6 ÁRVÍZEK

6.7 SZÁRAZSÁG

6.8 FUTÓTÜZEK

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

7.1 GLOBÁLIS TENGERSZINT-EMELKEDÉS

7.2 AZ USA TENGERSZINT-EMELKEDÉSE

7.3 A VÁRHATÓ TENGERSZINT-EMELKEDÉS

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

8.1 BEVEZETÉS

8.2 OKTULAJDONÍTÁSI MÓDSZEREK

8.3 A GLOBÁLIS FELMELEGEDÉS OKTULAJDONÍTÁSA

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

8.3.2 Optimális ujjlenyomatvétel

8.3.3 Idősoros módszerek

8.4 CSÖKKENŐ BOLYGÓ-ALBEDO ÉS A LEGUTÓBBI REKORMELEGEDÉS

8.5 AZ ÉGHAJLATI HATÓTÉNYEZŐKRE VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6 SZÉLSŐSÉGES ESEMÉNYEKRE (EEA) VONATKOZÓ OKTULAJDONÍTÁS

8.6.1 Esettanulmány – a 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

9.1 ÖKONOMETRIAI ELEMZÉSEK

9.2 A CO_2-DÚSULÁS TEREPI ÉS LABORATÓRIUMI ELEMZÉSE

9.3 TERMÉSMODELLEZÉSI METAELEMZÉSEK

9.4 A CO_2-TRÁGYÁZÁS ÉS A TÁPANYAGVESZTÉS

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

10.1 TÁRSADALMI-GAZDASÁGI HÁTTÉR

10.2 AZ ADATOK ÁLTAL JELENTETT KIHÍVÁSOK

10.3 HALÁLOZÁS A HŐMÉRSÉKLETI SZÉLSŐSÉGEK MIATT

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

11.1 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS GAZDASÁGI NÖVEKEDÉS

11.1.1 Áttekintés

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adatalapú elemzése

11.2 MODELLEK A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGÉRE (SCC)

11.2.1 Az SCC becslése

11.2.2 Az SCC változásai

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

11.2.4 Fordulópontok

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

12.1 A LÉPTÉKPROBLÉMA

12.2 ESETTANULMÁNY: AZ USA-GÉPJÁRMŰVEK KIBOCSÁTÁSA

12.3 ZÁRÓGONDOLATOK

SZÓJEGYZÉK

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

A SZERZŐKRŐL

MINISZTERI ELŐSZÓ

Az energia, az integritás és az emberi potenciál ereje

Egész életem során kiváltságos helyzetben volt részem: számos területen dolgozhattam energiaipari vállalkozóként (atomenergia, geotermikus energia, földgáz és egyebek), jelenleg pedig Donald Trump elnök alatt szolgálok energiaügyi miniszterként. De mindenekelőtt fizikus kutató vagyok, aki a modern energiát csodás kincsnek tekinti. Ez hajtja a modern élet minden területét, mozgatja az összes iparágat, Amerikát olyan energianagyhatalommá téve, amely képes a globális fejlődés hajtóerejévé válni.

Az emberiség felvirágzása az elmúlt két évszázadban egy ünneplésre méltó történet. Mégis azt hajtogatják nekünk –megállás nélkül –, hogy azok az energiarendszerek, amelyek lehetővé tették ezt a fejlődést, immár létünket fenyegetik. Érvelésük szerint a szénhidrogén alapú üzemanyagokról gyorsan le kell mondani, különben a bolygó pusztulását kockáztatjuk.

E nézet beható vizsgálatot követel. Ebből a célból rendeltem meg a jelentést. Az éghajlatváltozásról és az energiáról jobban átgondolt és tudományosan megalapozott párbeszédet kívánok ösztönözni. Szakmai hátterem birtokában áttekintettem az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) jelentéseit, az Egyesült Államok kormányainak értékeléseit, valamint a tudományos szakirodalmat. Számos klímakutatóval is kapcsolatba léptem, többek között e jelentés szerzőivel is.

Azt tapasztaltam, hogy a média gyakran eltorzítja a tudományt. A klímaváltozásról sokakban egy eltúlzott, illetve hiányos kép alakítanak ki. Az érthetőség és az egyensúly megteremtése érdekében felkértem egy független szakértőkből álló, sokféle szempontot figyelembe vevő csapatot, hogy kritikusan tekintsék át a klímatudomány jelenlegi helyzetét, különös tekintettel az Egyesült Államokbeli viszonyokra.

Nem azért választottam ezeket a szerzőket, mert mindig egyetértünk – egyáltalán nem. Sőt, lehet, hogy ők sem mindig értenek egyet egymással. Hanem a szigorúságuk, a becsületességük és a vitaszínvonal emelése érdekében választottam őket. Nem gyakoroltam befolyást a következtetéseikre. Amit olvasni fognak, az az ő művük, ami az elérhető legjobb adatokon és tudományos értékeléseken alapul.

A jelentést alaposan átnéztem, és úgy vélem, hogy hűen tükrözi a klímatudomány jelenlegi helyzetét. Ennek ellenére számos olvasó meglepődhet a következtetésein – amelyek lényegi módon eltérnek attól, amit a fősodor (a mainstream narratíva) állít. Ez annak a jele, hogy a nyilvánosság előtti párbeszéd a tudománytól nagyon távolra került.

A helyes irány eléréséhez nyílt, tiszteletteljes és tájékozott vitákra van szükség. Ezért erről a jelentésről nyilvános véleményeket kérek. Politikai döntéshozatalunk középpontjában a becsületes vizsgálódásnak és a tudományos átláthatóságnak kell állnia.

Az éghajlatváltozás valós, és figyelmet érdemlő kérdés. De nem ez az emberiség előtt álló legnagyobb fenyegetés. Inkább a globális energiaszegénység érdemelne megkülönböztetett figyelmet. Adatok értékelésével foglalkozom, tudom tehát, hogy az emberi életkörülmények javítása a megbízható, megfizethető energiához való hozzáférés bővítésétől függ. Az éghajlatváltozás ugyan kihívást jelent, de nem katasztrófa! Ami ténylegesen veszélyeztetheti az emberi jólétet, az a tényeket mellőző, félelemre építő, félrevezető szakpolitika.

Az energiairányítás új korszakának küszöbén állunk. Ha az innovációt inkább támogatjuk, mint korlátozzuk, Amerika világvezető szerepet tölthet be a tisztább, bőségesebb energia biztosításában – milliárdokat felemelve a mélyszegénységből, erősítve gazdaságunkat és javítva környezetünket.

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

E jelentés áttekinti mindazokat a tudományos bizonyosságokat és bizonytalanságokat, amelyek arról szólnak, hogy az antropogén szén-dioxid (CO_2) és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátása miként befolyásolta, vagy fogja befolyásolni az ország (az USA) éghajlatát, a szélsőséges időjárási eseményeket, valamint a társadalmi jólét egyes mutatóit. E kibocsátás egy összetett és változékony széncikluson keresztül megemeli a légköri CO_2-koncentrációt, és a többlet CO_2 egy része évszázadokig fennmarad a légkörben.

A megemelkedett CO_2-koncentráció közvetlenül elősegíti a növények növekedését, globálisan hozzájárulva a bolygó „zöldüléséhez" és a mezőgazdasági termésnöveléshez [2.1. szakasz, 9. fejezet]. Emellett csökkenti az óceánok lúgosságát (a pH értékét). Lehetséges, hogy káros a korallzátonyokra, bár a Nagy-korallzátony közelmúltbeli feléledése nem erre utal [2.2. szakasz].

A szén-dioxid egyben üvegházhatású gáz is, melegítő hatást gyakorolva az éghajlatra és az időjárásra [3.1. szakasz]. Az éghajlatváltozással kapcsolatos előrejelzésekhez a jövőbeli kibocsátásról forgatókönyvek szükségeltetnek. Bizonyítékok léteznek arra, hogy a klímahatásokkal foglalkozó szakirodalomban széles körben használt forgatókönyvek a megfigyelt és valószínűsíthető jövőbeli kibocsátási trendeket eltúlozzák [3.1. szakasz].

A világban létező több tucatnyi globális klímamodell édeskevés útmutatást ad arra vonatkozóan, hogy az éghajlat milyen mértékben reagál a megemelkedett CO_2-szintre: ezek szerint a CO_2-koncentráció megduplázódása esetén a földfelszínen az átlagos felmelegedés mértéke 1,8°C és 5,7°C között mozog [4.2. szakasz]. Az adatalapú módszerek alacsonyabb és szűkebb tartományt jeleznek [4.3. szakasz]. A globális klímamodellek az elmúlt évtizedek éghajlatát általában „forró" módon írják le – a valóságot eltúlzó felszíni felmelegedést mutatnak, valamint túl nagy felmelegedés-felerősödést az alsó és a középső troposzférában [5.2-5.4. szakaszok]. A túlságosan érzékeny modellek és a jövőbeli kibocsátásokra vonatkozó valószínűtlen, szélsőséges forgatókönyvek kombinációja a jövőben vélt felmelegedési előrejelzésekben nagy túlzásokra vezet.

Az Egyesült Államokban a legtöbb szélsőséges időjárási esemény alakulásában nem mutatkozik hosszú távú tendencia. Az USA történelmi adatai nem támasztják alá a hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok gyakoriság- vagy intenzitás-növekedésére vonatkozó állításokat [6.1-6.7. szakaszok]. Ezenkívül az tűzvész-aktivitás változásainak értékelésekor az erdőgazdálkodási gyakorlatot rendszerint figyelmen kívül hagyják [6.8. szakasz]. A globális tengerszint 1900 óta körülbelül 20 centiméterrel emelkedett, de ebben jelentős regionális eltérések vannak, amiket elsősorban helyi szárazföld-süllyedés okoznak; az amerikai parti tengerszint-mérők (mareográfok) mérésösszesítései nem mutatják, hogy a tengerszint-emelkedés egyértelműen nagyobb ütemű lenne, mint amekkora a történelmi átlag [7. fejezet].

Az éghajlatváltozás vagy a szélsőséges időjárási események emberi CO_2-kibocsátásnak való tulajdonítást (az ún. oktulajdonítást) a természetes éghajlati változékonyság, az adatok elérhetősége és a modellek eredendő hiányosságai miatt megkérdőjelezhető [8. fejezet]. Ezenkívül az is lehetséges, hogy a naptevékenység 20. század végi felmelegedéshez való hozzájárulása alá lett becsülve [8.3.1. szakasz].

Mind a modellek, mind a tapasztalatok arra utalnak, hogy a CO_2 által kiváltott felmelegedés gazdaságilag minden bizonnyal kevésbé káros, mint azt általában hiszik, és a túlzottan agresszív mérséklési politikák inkább bizonyulhatnak károsnak, mint előnyösnek [9., 10. fejezet, 11.1. szakasz]. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségeit számszerűsíteni próbáló gazdasági kárbecslések rendkívül érzékenyek a kiindulási feltételezésekre, ezért információtartalmuk igen korlátozott [11.2. szakasz].

Az USA politikai intézkedései várhatóan kimutathatatlanul kis közvetlen hatással vannak a globális éghajlatra, és bármilyen hatás csak hosszú időkéséssel jelentkezik [12. fejezet]

BEVEZETŐ

E dokumentum keletkezése 2025. március végére vezethető vissza, amikor Wright miniszter összeállított egy független csoportot, hogy jelentés készüljön az energiapolitika-alkotás szempontjából releváns klímatudományi kérdésekről, többek között a közvélekedést megkérdőjelező bizonyítékokról és nézőpontokról. A munka elvégzésébe azzal a feltétellel egyeztünk bele, hogy sem a miniszter, sem az Energiaügyi Minisztérium, sem más kormányzati alkalmazott nem gyakorol szerkesztői felügyeletet. Ezt a feltételt a folyamat során végig betartottuk, és az csoport teljesen függetlenül dolgozott.

A csapat április elején kezdte meg a munkát, május 28-i határidővel, hogy a tervezetet be lehessen nyújtani egy energiaügyi minisztériumi belső felülvizsgálatra. A rövid határidő és az anyag technikai jellege miatt nem tudtunk teljesen átfogó áttekintést adni. Ezért inkább olyan témákra összpontosítottunk, amelyeket a komoly, elismert tudományos szakirodalom is tárgyal; amelyek a feladatunk szempontjából időszerűek; amelyeket a legújabb értékelő jelentések alábecsülnek vagy hiányoznak belőlük; és amelyek a mi kompetenciánkba tartoznak.

Bár a jelentés célja, hogy a nem szakértők számára is érthető legyen, kihagytunk néhány bevezető vagy magyarázó anyagot, ezek másutt könnyen elérhetők. Nem törekedtünk arra sem, hogy áttekintsük a tárgyalt témákhoz tartozó teljes szakirodalmat. Amennyire csak lehetséges volt, a 2020 óta megjelent szakirodalomra összpontosítottunk, és hivatkoztunk az előző IPCC és NCA (nemzeti klímaértékelési) értékelő jelentésekre. Ahol lehetséges volt, 2024-ig terjedő adatokat is felhasználtunk.

Az szerzői team hálás Wright miniszternek a jelentés elkészítésének lehetőségéért, valamint a független tudományos értékelés és a nyílt tudományos vita támogatásáért. Hálásak vagyunk az Energiaügyi Minisztérium (DOE) és a nemzeti laboratóriumi bírálók anonim csapatának is, mert hozzájárultak ahhoz, hogy a végleges jelentés még jobb legyen.

John Christy, Ph.D.

Judith Curry, Ph.D.

Steven Koonin, Ph.D.

Ross McKitrick, Ph.D.

Roy Spencer, Ph.D.

I. RÉSZ: KÖZVETLEN EMBERI HATÁS AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A KLÍMÁRA

1 A SZÉN-DIOXID, MINT SZENNYEZŐ ANYAG

Fejezet-összefoglaló

A szén-dioxid (CO_2) sok tekintetben különbözik az úgynevezett szabványos légszennyező anyagoktól (a CAP-októl). Nem befolyásolja a helyi levegőminőséget, és környezeti szinten nincsenek humántoxikológiai következményei. A globális éghajlatra gyakorolt hatása miatt veszik számba lehetséges tényezőként.

Az 1970-es Tiszta Levegő Törvény hat úgynevezett EPA-szabályozás alá eső kritérium szerinti légszennyező anyagot határozott meg: szálló por, talajközeli ózon, kén-dioxid, nitrogén-dioxid, ólom és szén-monoxid. 2007-ben a Legfelsőbb Bíróság kimondta, hogy az üvegházhatású gázok (köztük a CO_2) ugyancsak „szennyező anyagok", és rájuk is vonatkozik a Tiszta Levegő Törvénye (Mass. kontra EPA, 2007). Bár a „szennyezőanyag" definíciója végső soron jogi kérdés, fontos tudományos különbségek vannak a CO_2 és a kritérium szerinti (szabványos) légszennyező anyagok között. Ez utóbbiak szabályozási ellenőrzés alatt állnak, mivel a koncentrációjuktól függően helyi problémákat okoznak: az embereknek kellemetlenséget (szagot, láthatóság-csökkenést), növényi károsodást, és kellően magas expozíciós szintek esetén toxikológiai hatásokat okoznak. Ezzel szemben a CO_2 szagtalan, nem befolyásolja a láthatóságot, és környezeti szinten nincs toxikológiai hatása. A légkör természetes része, és kulcsfontosságú eleme az emberi és növényi légzésnek. A CO_2 elengedhetetlen a növényi fotoszintézishez, magasabb szintje pedig előnyös a növényzet számára. E tekintetben a CO_2 hasonló a vízgőzhöz.

A kültéri környezet levegője ma körülbelül 430 ppm CO_2-t tartalmaz, ami évente körülbelül 2 ppm-mel emelkedik. Az Egyesült Államok Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala irányelveket ad ki a beltéri munkahelyekre, ahol megemelkedett CO_2-szinttel találkozhatunk, például ahol szárazjeget használnak. A megengedett expozíciós határérték 5000 ppm 8 órán át (OSHA, 2024). Allen et al. (2015) arról számolt be, hogy az irodai fülkékben dolgozók teljesítménye, amikor 1000-1500 ppm feletti CO_2-szintnek voltak kitéve, bizonyos kognitív feladatokban csökkent. E szint jóval magasabb, mint bármely, a 22. század végéig valószínűsíthető kültéri környezeti érték.

A légkörben lévő CO_2 növekvő mennyisége közvetlenül befolyásolja a földi rendszert azáltal, hogy elősegíti a növények növekedését (a globális zöldülés), ezáltal növeli a mezőgazdasági terméshozamot, és semlegesíti az óceán lúgosságát. A CO_2-vel kapcsolatos elsődleges aggodalom azonban az üvegházgázként (ÜHG) betöltött szerepe, amely megváltoztatja a Föld energiaegyensúlyát, felmelegíti a bolygót. Az, hogy az éghajlat hogyan reagál erre a hatásra, egy összetett kérdés, ez tölti ki a jelentés nagy részét.

Hivatkozások

Allen, J., Macnaughton, P., Satish, U., et al. (2015). A kognitív funkciók pontszámainak összefüggései a szén-dioxid-, a szellőztetés- és az illékony szerves vegyületek expozíciójával irodai dolgozóknál: Kontrollált expozíciós vizsgálat zöld és hagyományos irodai környezetekben. Környezeti egészségügyi perspektívák. 124. https://doi.org/10.1289/ehp.1510037

Massachusetts kontra Környezetvédelmi Ügynökség, 549 U.S. 497 (2007). https://www.oyez.org/cases/2006/05-1120

USA Környezetvédelmi Ügynökség. (é.n.). Kritériumok a légszennyezőkre. https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants

USA Munkahelyi Biztonsági és Egészségügyi Hivatala. (2024). OSHA foglalkozási vegyi adatbázis: Szén-dioxid. https://www.osha.gov/chemicaldata/183

2 A CO_2 KÖZVETLEN HATÁSA A KÖRNYEZETRE

Fejezet-összefoglaló

A CO_2 fokozza a fotoszintézist és javítja a növények vízfelhasználási hatékonyságát, ezáltal elősegíti a növények növekedését. A globális zöldülés, amely részben a légkörben megnövekedett CO_2-szintnek köszönhető, mindegyik kontinensen jól kimutatható.

Ha a CO_2 a tengervízben elnyelődik, az óceánok lúgossága csökken. A pH-érték jelenkori csökkenése nem lépi túl az évezredes időléptékben megfigyelhető természetes változékonysági tartományt. Az óceáni élővilág nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak. A pH-csökkenés hátrányosan befolyásolhatja a korallokat, ugyanakkor az ausztrál Nagy-korallzátony az elmúlt években jelentős növekedést mutat.

2.1 A CO_2, mint a globális zöldüléshez hozzájáruló tényező

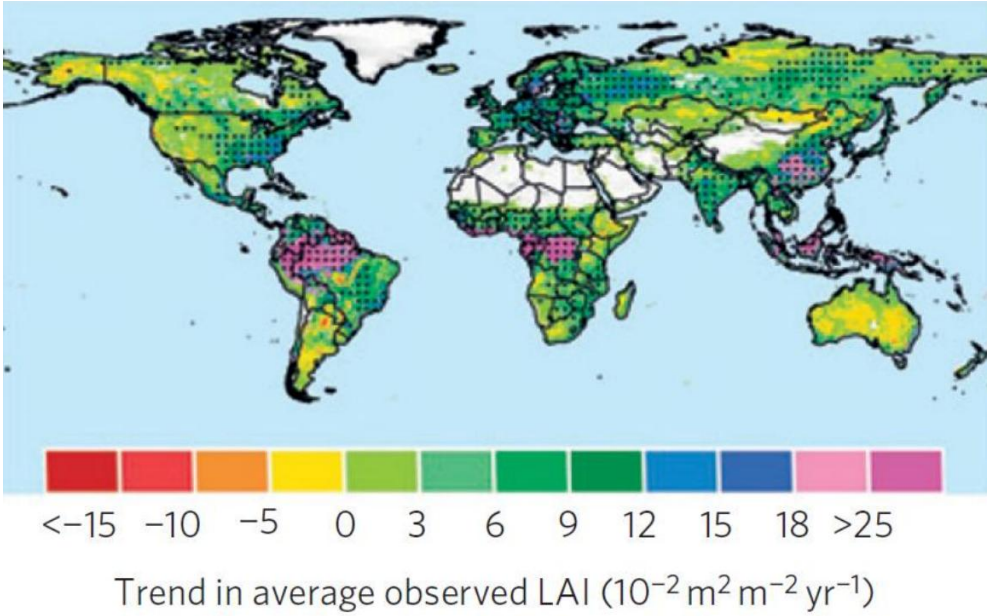
A légkörben az emelkedő CO_2-koncentráció fontos pozitív hatással bír, mivel elősegíti a növények növekedését a fotoszintézis fokozásával és a vízfelhasználás hatékonyságának javításával. Ami megnyilvánul az alábbiakban tárgyalt „globális zöldülés” jelenségében, valamint a 10. fejezetben tárgyalt javuló mezőgazdasági hozamokban is. Itt csak a CO_2-trágyázásra összpontosítunk; a hőmérséklet- és csapadékváltozások együttes hatásainak kutatását a 10. fejezet tárgyalja.

2.1.1 A globális zöldülés mérése

A „zöldülés” a földfelszín növényzettel borított részarányának növekedését jelenti. A műholdakkal mért „levélfelület-index” (LAI) segítségével számszerűsíthető is. Az elmúlt évtized során számos tanulmány erősítette meg a globális zöldülési mintázatot (LAI növekedés), amely részben az emelkedő CO_2-szintnek tulajdonítható. Zhu et al. (2016) az elsők között voltak, akik arról számoltak be, hogy a globális zöldülés műholdas érzékelők segítségével kimutatható. 1982 és 2011 között a Föld területének 25-50 százalékán észleltek zöldülést, szemben a mindössze négynél alig több százaléknyi „barnulással”, és a zöldülés 70 százalékát az emelkedő CO_2-szintnek tulajdonították (lásd a 2.1. ábrát). További hozzájárulási tényezőt jelent a földhasználat változása, a felmelegedés és a nitrogén. A CO_2-nek tulajdonítható részarány a trópusokon volt a legnagyobb; a CONUS-ban (az USA területileg összefüggő államaiban) egyéb tényezők játszottak dominánsabb szerepet.

Zeng et al. (2017) megerősítette a zöldülés mintázatát, megjegyezve, hogy a globális levélfelületet harminc év alatt 8 százalékkal növekedett, és hogy a zöldülés mérsékelte a felmelegedést. A zöldülést világszerte megfigyelték. Chen et al. (2019) kimutatták, hogy Kínában és Indiában ennek a nagy részét földgazdálkodási változások okozzák. Így, míg Kína a globális növényzeti területnek csak 6,6 százalékát teszi ki, a LAI globális nettó növekedésében 25 százalékot tesz ki. Piao et al. (2020) megjegyezték, hogy a zöldülés még az Arktiszon is megfigyelhető. A CO_2-trágyázás hatásait befolyásolja a helyi hőmérséklet, valamint a tápanyagok és a víz rendelkezésre állása, amelyek mindegyike regionálisan változik.

Míg a növénymodellek az emelkedő CO_2-szintre válaszreakcióként a fotoszintézis növekedését jósolják, Haverd et al. (2020) a modellelőrejelzéseknél sokkal nagyobb CO_2-trágyázási arányról számoltak be. Vagyis a CO_2-trágyázás 1900 óta 30 százalékkal növelte a megfigyelt globális fotoszintézist, szemben a növénymodellek által előrejelzett 17 százalékkal. Ha ez igaz, az arra utalna, hogy az emelkedő CO_2 társadalmi-gazdasági hatásainak globális modelljei alábecsülték a növényekre és a mezőgazdaságra gyakorolt előnyöket. Keenan et al. (2023) azonban alacsonyabb trágyázási arányt becsültek, ami jobban összhangban van a modellekkel. A CO_2-trágyázás és a mezőgazdaság közötti kapcsolatot a 9. fejezetben tárgyaljuk.



2.1. ábra: Az átlagos Levélfelületi Index (LAI). Forrás: Zhu et al. 2016, 3. ábra. A LAI dimenzió nélküli mennyiség, amely a növényi lombkorona levélfelületének nagyságát írja le a talajfelülethez viszonyítva.

Piao et al. (2020), valamint Chen et al. (2024) arról számolnak be, hogy a zöldülési trend folytatódik, nincsenek lassulási jelek, és továbbra is a CO_2-trágyázás a domináns hajtóerő.

2.1.2 Fotoszintézis és CO_2-szint

A növények fotoszintézissel építik fel a biomasszát, amely folyamat a szén-dioxidot, a vizet és a fényt cukorrá alakítja. A fotoszintézisért felelős növényi enzim a ribulóz-1,5-biszfoszfát-karboxiláz/oxigenáz vagy „Rubisco". A fotoszintézis akkor indul be, amikor CO_2 a Rubisco enzim felületén rendelkezésre áll, ahol 3 szénatomos molekulává alakul, majd beépül a növény tömegébe. Ezt „C3" folyamatnak nevezik.

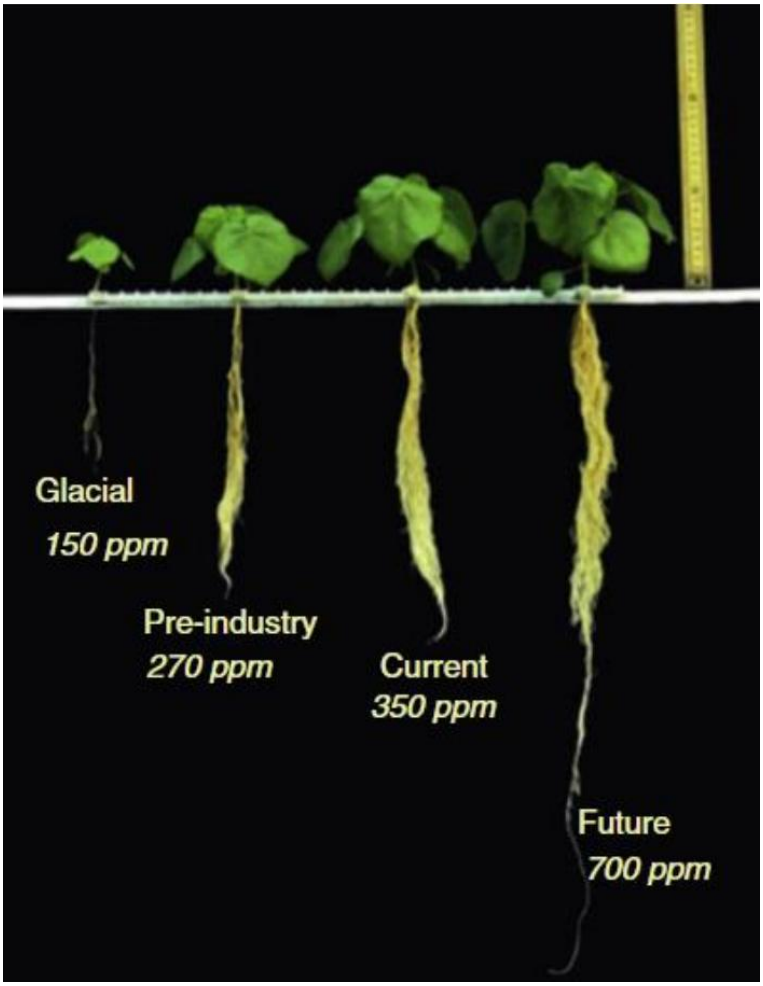
A Rubisco enzim becslések szerint körülbelül 3 milliárd évvel ezelőtt fejlődött ki. A geológiai idők során a Föld légkörének CO_2-szintje általában sokszorosa volt a mai értéknek. Körülbelül 400 millió évvel ezelőtt a CO_2-szint becslései szerint 2000-4000 ppm volt, a 200 és 50 millió évvel ezelőtti időszak nagy részében pedig 1000 ppm vagy annál magasabb (Berner 2006, Judd et al. 2024). A legutóbbi 35 millió évben a légköri CO_2-szint folyamatosan csökkent, az eljegesedések idején akár 170 ppm-re is visszaesett (Gerhart és Ward 2010). Bár a CO_2 jelenkori változásának üteme a korábbi időszakokéhoz képest magas lehet, geológiai bizonyítékok szerint a növények és az állatok a jelenleginél sokkal magasabb CO_2-szint mellett fejlődtek ki.

Az alacsony CO_2-szintre válaszul egyes növények a fotoszintézisre egy másik módot, az ún. C4-et fejlesztettek ki, amelyben a CO_2 a Rubisco közelében koncentrálódik, lehetővé téve a C3 folyamat hatékonyabb működését. Mezőgazdasági célokra a növénykategóriák a következők:

• C3: rizs, búza, szójabab és a legtöbb más növény

• C4: kukorica, cukornád, köles, cirok

A légköri CO_2-szint további csökkenése esetén a növényi növekedés lelassult volna, majd végül leállt volna. 180 ppm alatt számos C3 faj növekedési üteme a 350 ppm-hez képest 40-60 százalékkal csökken (Gerhart és Ward 2010), és a növekedés 60-140 ppm CO_2-koncentrációjú kísérleti körülmények között teljesen leállt. Egyes C4 növények még 10 ppm-es CO_2-szinten is képesek növekedni, bár nagyon lassan (Gerhart és Ward 2010).



2.2 ábra: A sárga selyemmályva (Abutilon theophrasti) 14 nap alatti növekedése, miközben az összes többi kísérleti körülmény a CO_2-szint kivételével megegyezett. Forrás: Gerhart and Ward (2010). A képen a "Current" (jelenlegi) szint 1988-nak felel meg.

A jelenlegi CO_2-szint körülbelül 430 ppm, szemben az 1800-as évek eleji 280 ppm-mel. A növények pozitív reakcióját a CO_2-többletre a 2.2. ábra szemlélteti, Gerhart és Ward (2010) munkájából reprodukálva. Az ábra a CO_2 növekedési hatását mutatja a sárga selyemmályva (Abutilon theophrasti) palántákra 14 nap alatt, kontrollált körülmények között, ahol csak a CO_2-kitettség változik. A CO_2 150 ppm-ről 350 ppm-re történő emelésével elért nyereség a 700 ppm-re való további megduplázódás esetén is folytatódik. A legutóbbi több mint 60 évben a növekvő CO_2-szintre adott növényi válaszról több ezer tanulmány készült. A legfontosabb kutatási téma az, hogy a növények, különösen a C3 növények, profitálnak a többlet CO_2-szintből. A CO_2 két mechanizmus révén biztosít növekedési előnyt:

• A fotoszintézis fokozódása a fent leírt anyagcsere-módokon keresztül.

• A vízfelhasználási hatékonyság megnövekedett. Ez azért történik, mert a növények a levél felszínén lévő gázcserenyílások (pórusok) kinyitásával vonják be a CO_2-t. Amikor a CO_2 szűkösen áll rendelkezésre, a gázcserenyílásokat hosszú ideig kell tágra nyitva tartani, hogy a víz elpárologhasson. CO_2-ben dús körülmények között a gázcserenyílások hosszabb ideig maradnak zárva, így segítve a növényt a víz hosszabb ideig történő megtartásában, ezáltal növelve a vízfelhasználási hatékonyságot. A klímaváltozás amerikai mezőgazdaságra gyakorolt konkrét hatásait a 9. fejezetben tekintjük át.

2.1.3 Növekvő CO_2- és növényi vízfelhasználási hatékonyság

Derying et al. (2016) áttekintették a növények vízhozamát (CWP), azaz a hozam/felhasznált víz arányra vonatkozó bizonyítékokat, ráirányítva a figyelmet arra, hogy a CO_2 képes a fotoszintézis fokozására és a levélszintű párologtatás csökkentésére (a levéllégzés során a vízveszteség csökkentésére). Felmérték az összes rendelkezésre álló FACE-adatot (szabadlevegős CO_2-dúsulást – ld. 9. fejezet) a kukorica, a búza, a rizs és a szója terméshozam-változásairól, és kombinálták azokat a 2080-as állapotra vonatkozó terméshozam-válaszokat szimuláló növénymodell-adatokkal a szélsőséges RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv szerint négy termesztő régióban (trópusi, száraz, mérsékelt és hideg), amelyek mindegyikét esővel öntözött és mesterségesen öntözött alrégiókra osztották. Jelentésük szerint a CO_2-trágyázás nélküli modellek minden régióban CWP-veszteséget jósoltak, de ezeket a CO_2-trágyázás bőven ellensúlyozta, így minden régió nettó CWP-növekedést mutatott. Deryng et al. (2016) arról is beszámolt, hogy a felmelegedés búza- és szójababhozamokra gyakorolt negatív hatásait teljes mértékben ellensúlyozta a CWP-növekedés. A rizs esetében a mitigáció akár 90%-osnak, a kukorica esetében pedig 60%-osnak bizonyult.

Hasonlóképpen, Cheng et al. (2017) megjegyezte, hogy az 1982 és 2011 között a növekvő CO_2-megkötés miatt megnövekedett bruttó nemzeti terméshozam (GDP) olyan nagymértékű nyereséggel járt együtt a növényzet vízfogyasztásában (CWP), hogy a növények globális vízfelhasználása a többlet biomassza ellenére sem nőtt.

Deryng et al. (2016) azt feltételezte, hogy a klímaváltozás „súlyosbítja a vízhiányt”. Míg a modellek azt jósolják, hogy a felmelegedés hatására a száraz területek nagysága nő, a jelenlegi adatok az ellenkezőjét mutatják: még a száraz területek is zöldülnek. Zhang et al. (2024) arról számolnak be, hogy a megnövekedett CO_2-szint miatt „a száraz területek fokozódó szárazsága nem vezet a növényzet termőképességének általános csökkenéséhez”; a jelenleg száraz területeknek legfeljebb csak 4 százalékán fog fokozódni az elsivatagosodás.

2.1.4 A CO_2-trágyázás előnyei az IPCC-jelentésekben

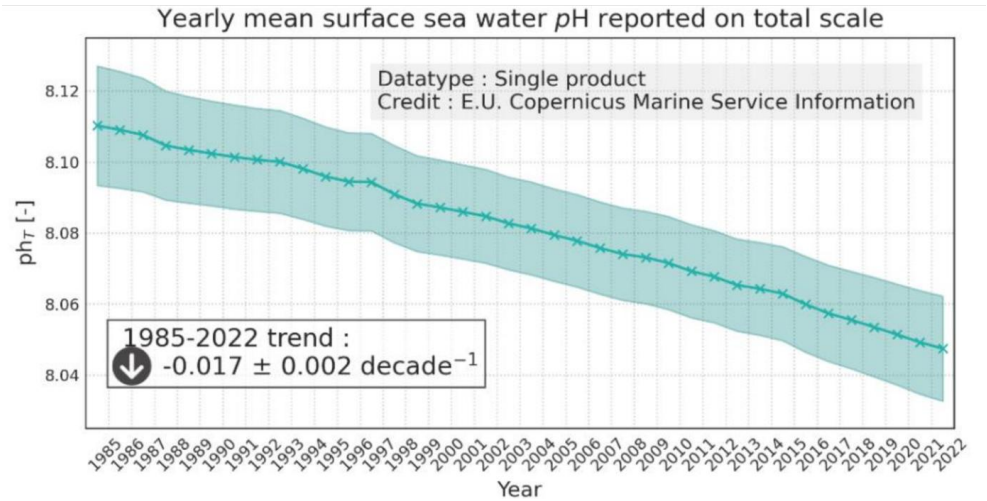
Az IPCC alig foglalkozik a globális zöldüléssel és a mezőgazdasági növények CO_2-trágyázásával. A téma röviden említésre kerül az IPCC 6. és korábbi értékelő jelentéseinek törzsében, de az összes összefoglaló dokumentumból kimarad. Az AR6 I. munkacsoport jelentésének 2.3.4.3.3. szakasza, melynek címe „Globális zöldülés és barnulás”, rámutat, hogy az IPCC klímaváltozásról és földhasználatról szóló különjelentése nagy bizonyossággal arra a következtetésre jutott, hogy a zöldülés az elmúlt 2-3 évtized során globálisan fokozódott. Ezután arra tér rá, hogy a zöldülési trendben eltérések vannak az adathalmazok között, és arra a következtetésre jut, hogy bár nagy bizonyossággal állítják, hogy zöldülés történt, a trend nagyságrendjét alacsony megbízhatóságúnak nevezik. Az AR6 I. és II. munkacsoport jelentéseinek néhány további fejezetében röviden megemlítik a CO_2-trágyázás hatásait és a vízfelhasználás hatékonyságának javulását.

Összességében elmondható azonban, hogy az AR5 és AR6 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalói, a technikai összefoglalók és a szintézisjelentések nem tárgyalják a témát.

2.2 A lúgos óceánok

2.2.1 A pH változása

A semleges vizes oldat pH-ja 7,0, míg a 7,0-nél nagyobb pH-jú oldat lúgos (más néven bázikus), a 7,0-nél kisebb pH-jú pedig savas. A felszíni tengervíz jelenkori globális átlagos pH-értékét 8,04-re becsülik (Copernicus Marine Service 2025, 2.3. ábra), szemben az iparosodás előtti időkben becsült 8,2-es értékkel (Gattuso és Hansson, 2011). Ahogy a légkör CO_2-koncentrációja emelkedett, az óceánok többet nyeltek el, ami csökkentette a pH-értéküket. Az óceánok pufferkapacitásától függően várható, hogy idővel némileg kevésbé lesznek lúgosak, ami összhangban van a pH megfigyelt csökkenésével.

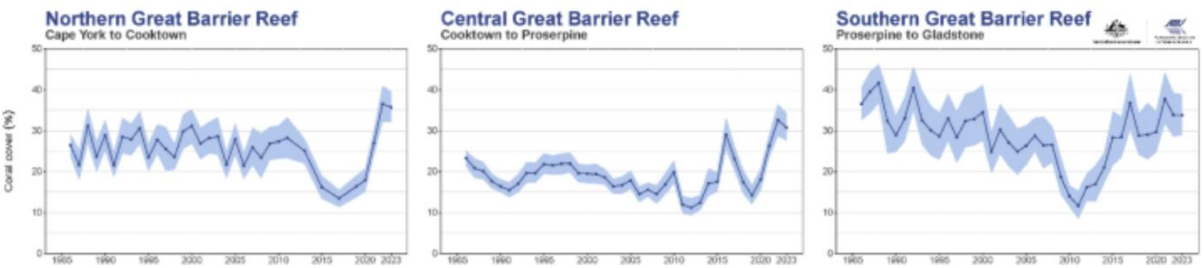


2.3 ábra: Óceáni pH 1985 – 2022. Forrás: Copernicus Marine Service 2025

E folyamatot gyakran „óceáni savasodásnak” nevezik, de ez félrevezető elnevezés, mivel az óceánok várhatóan nem válnak savassá; pontosabb lenne az „óceán semlegesítődése”. Ha a víz savassá válna, akkor is az a vélekedés, hogy az óceánokban az élet akkor fejlődött ki, amikor az óceánok enyhén savasak voltak, 6,5 és 7,0 közötti pH-értékkel (Krissansen-Totton et al., 2018). Többezer éves időléptékben a bórizotóp-proxy mérések azt mutatják, hogy az óceán pH-értéke a legutolsó eljegesedés idején (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt) 7,4 vagy 7,5 körül volt, és a mai értékekre emelkedett, ahogy a világ az eljegesedés csökkenése során felmelegedett (Rae et al., 2018). Így az óceáni élőlények ellenállónak tűnnek az óceán pH-értékének természetes hosszú távú változásaival szemben, mivel a tengeri élőlények széles pH-tartománynak voltak kitéve.

2.2.2 Korallzátony-változások

Vannak aggodalmak arra vonatkozóan, hogy a tengervíz pH-értékének csökkenése csökkenti a korallzátonyok kalcifikációs (meszesedési) sebességét. A korallzátonyok azonban már most is nagy pH-ingadozásokat mutatnak, részben a zátonyban zajló napi fotoszintézis-aktivitás miatt; a mért pH-értékek a nappali 9,4-től éjszaka 7,5-ig terjedően változnak (Revelle és Fairbridge, 1957). De’ath et al. (2009) arról számol be, hogy Ausztrália Nagy-korallzátonyának (GBR, a világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája) egy részén 1990 óta 14 százalékos csökkenést tapasztaltak a meszesedésben. Ezt a víz hőmérsékletének emelkedésével és a pH csökkenésével igyekeztek magyarázni. Ridd et al. (2013) azonban kimutatta, hogy ez a jelentés egy elfogult adatelemzés eredménye, amely korrigálva nem mutatott változást a meszesedési arányban. Mindazonáltal az eredeti cikk által kiváltott riadalom továbbra is fennáll, amint azt az eredeti tanulmányra publikált hivatkozások nagy száma (541) is bizonyítja, szemben a javításra vonatkozó dolgozat mindössze 11 hivatkozásával (2025. április 30-i állapot szerint). Az Ausztrál Tengertudományi Intézet legfrissebb éves GBR-körülmény-összefoglalója szerint a korallzátony-produktivitás erőteljesen fellendült (AIMS, 2023). A 2.4. ábra az AIMS keménykorall-borításra vonatkozó felméréseinek eredményeit mutatja, a zátonyterület százalékában kifejezve. A GBR 2011 előtti csökkenésének nagy része az intenzív trópusi ciklontevékenységnek (Beeden et al., 2015), valamint egy sor tengeri hőhullámnak, mezőgazdasági lefolyásnak és invazív fajoknak tudható be (Woods Hole, 2023). Tekintettel a GBR-meszesedés 1990 és 2009 közötti csökkenésére és a légköri CO_2-szint folyamatos növekedésére, a fellendülés egyes megfigyelőket meglepett.



2.4 ábra: A keménykorall-borítás a Nagy korallzátony három régiójában 1985-től 2023-ig. Forrás: AIMS 2023.

Egyre inkább felismerik, hogy a publikációs torzítás (az óceáni savasodás riasztó eredményei, amelyeket a nagy hatású kutatási publikációk előnyben részesítenek) eltúlozza az óceáni pH-érték csökkenésének hatásait. Az ICES Journal of Marine Science különszáma ezt a problémát egy „Tágabb perspektíva felé az óceánsavasodási kutatásokról" című cikkben tárgyalta. A különszám bevezetőjében H. I. Browman kijelentette: „Ahogy az a tudomány egészére igaz, az olyan cikkeket, amelyek arról számolnak be, hogy az óceáni savasodásnak nincsenek hatásai, jellemzően nehezebb publikálni." (Browman, 2016).

Hasonlóképpen, az óceáni savasodás zátonyhalak viselkedésére gyakorolt negatív hatásának metaanalízise (Clements et al., 2021) az úgynevezett „csökkenési hatást" találta: a neves folyóiratokban megjelent, kezdetben drámai következtetéseket, amelyek a savasodás látszólag nagy hatásait mutatták, általában nagyobb mintákon végzett későbbi tanulmányok követték, amelyek arról számoltak be, hogy a hatások sokkal kisebb és jellemzően nem is léteznek. Felszólítják kollégáikat, hogy fejlesszék kutatási gyakorlataikat a „hanyatlási hatás" ellensúlyozása érdekében:

> E területen a jelentős hatást mutató tanulmányok túlnyomó többségét általában alacsony mintaelemszám jellemzi, mégis nagy impaktfaktorú folyóiratokban jelennek meg, és az idézettség tekintetében aránytalanul nagy szakterületi befolyásra tettek szert. Azt állítjuk, hogy az óceánok savasodásának a halak viselkedésére elhanyagolható közvetlen hatása van, és a jövőbeli kutatási területeken a hanyatlási hatás lehetőségének minimalizálása érdekében jobb megközelítéseket szorgalmazunk (Clements et al., 2021).

Összefoglalva, az óceáni élővilág összetett, és nagy része akkor fejlődött ki, amikor az óceánok a jelenlegihez képest savasabbak voltak. A modern korallok ősei először körülbelül 245 millió évvel ezelőtt jelentek meg. A CO_2-szint több mint 200 millió évvel később sokszor magasabb volt, mint ma. Az óceánok „savasodásának" a tengeri élővilágra gyakorolt hatásairól szóló nyilvános viták nagy része egyoldalú és eltúlzott volt.

Hivatkozások

AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

Australian Institute of Marine Science. (2022). Continued coral recovery leads to 36-year highs across two-thirds of the Great Barrier Reef. https://www.aims.gov.au/sites/default/files/202208/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

Beeden, R., Maynard, J., Puotinen, M., Marshall, P., Dryden, J., Goldberg, J., and Williams, G. (2015). Impacts and recovery from Severe Tropical Cyclone Yasi on the Great Barrier Reef. PLOS ONE, 10, e0121272. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121272

Berner, R. A. (2006). GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O_2 and CO_2. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70, 5653–5664. 8 Browman, H. I. (2016). Applying

organized scepticism to ocean acidification research. ICES Journal of Marine Science, 73(3), 529.1–536. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw010

Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., and Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2, 122–129. https://www.nature.com/articles/s41893-019-0220-7

Chen, X., Wang, Y., Liu, Y., and Piao, S. (2024). The global greening continues despite increased drought stress since 2000. Global Ecology and Conservation, 49, e02791. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989423004262

Cheng, L., Zhang, L., Wang, Y. P., et al. (2017). Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. Nature Communications, 8, 110. https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5

Clements, J. C., Sundin, J., Clark, T. D., and Jutfelt, F. (2022). Meta-analysis reveals an extreme "decline effect" in the impacts of ocean acidification on fish behavior. PLOS Biology, 20(2), e3001511. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001511

Copernicus Marine Service. (2025). Global ocean acidification – Mean sea water pH time series and trend from multi-observations reprocessing. https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaged/desc ription

De'ath, G., Lough, J., and Fabricius, K. (2009). Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. Science, 323, 116–119. https://doi.org/10.1126/science.1165283

Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., Warren, R., Jones, R., ... and Elliott, J. (2016). Regional disparities in the beneficial effects of rising CO_2 concentrations on crop water productivity. Nature Climate Change. https://doi.org/10.1038/nclimate2995

Gattuso, J. P., and Hansson, L. (Eds.). (2011). Ocean acidification: Background and history. Oxford University Press. Gerhart, L. M., and Ward, J. K. (2010). Plant responses to low [CO_2] of the past. New Phytologist, 188, 674–695. https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x

Haverd, V., B. Smith, J. G. Canadell, et al. (2020). Higher than expected CO_2 fertilization inferred from leaf to global observations. Global Change Biology, 26, 2390–2402. https://doi.org/10.1111/gcb.14950

Keenan, T. F., X. Luo, B. D. Stocker, et al. (2023). A constraint on historic growth in global photosynthesis due to rising CO_2. Nature Climate Change 13(12): 1376-1381 DOI: 10.1038/s41558023-01867-2.

Judd, E. J., Scotese, C. R., Young, S. A., et al. (2024). A 485-million-year history of Earth's surface temperature. Science, 385(6715). https://doi.org/10.1126/science.adk3705

Krissansen-Totton, J., Arney, G. N., and Catling, D. C. (2018). Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(6), 4105–4110. https://doi.org/10.1073/pnas.1721296115

Piao, S., X. Wang, T. Park, et al. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. Nature Reviews Earth & Environment 1(1): 14-27 DOI: 10.1038/s43017-019-0001-x

Rae, J. W. B., Burke, A., Robinson, L. F., et al. (2018). CO_2 storage and release in the deep Southern Ocean on millennial to centennial timescales. Nature, 562, 569–573. https://doi.org/10.1038/s41586018-0614-0

Revelle, R., and Fairbridge, R. W. (1957). Carbonate and carbon dioxide. In J. W. Hedgpeth (Ed.), Treatise on marine ecology and paleoecology (Vol. 1). Geological Society of America.

Ridd, P., Silva, E., and Stieglitz, T. (2013). Have coral calcification rates slowed in the last twenty years? Marine Geology, 346, 392–399. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.09.002

Woods Hole Oceanographic Institution. (2023). Is the Great Barrier Reef making a comeback? https://www.whoi.edu/oceanus/feature/is-the-great-barrier-reef-making-a-comeback/

Zeng, Z., Piao, S. Li, L., et al. (2017). Climate mitigation from vegetation biophysical feedbacks during the past three decades. Nature Climate Change. https://doi.org/10.1038/nclimate3299 9

Zhang, Y., Liu, Y., Chen, X., et al. (2024). Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. Nature Communications Earth and Environment, 5. https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., et al. (2016). Greening of the Earth and its drivers. Nature Climate Change, 6, 791–795. https://www.nature.com/articles/nclimate3004 10 ghajlatváltozási Kormányközi Testület Hatodik Értékelő Jelentése (2021) I. Munkacsoport Hozzájárulása. www.ipcc.ch.

3 EMBERI ÉGHAJLATI HATÁSOK

Fejezet-összefoglaló

A globális éghajlat minden időléptékben természet változások függvénye. Az antropogén CO_2-kibocsátás azáltal járul hozzá ehhez a változékonysághoz, hogy megváltoztatja a légkör teljes sugárzási energiaegyensúlyát.

Az IPCC lekicsinyli a Nap szerepét az éghajlatváltozásban, de léteznek olyan kézenfekvő napsugárzási rekonstrukciók, amelyek szerint a Nap hozzájárulhatott a jelenkori felmelegedéshez.

Az éghajlati előrejelzés („projekció") az IPCC kibocsátási forgatókönyvein alapul, de ezek trendjei rendre meghaladják a megfigyeléseket. Az elmúlt évek legtöbb éghajlattudományi hatástanulmánya a szélsőséges RCP 8.5 forgatókönyvön alapul. Ezt ma már valószínűtlennek tartják; szokásos üzletmeneti forgatókönyvként való alkalmazása félrevezető.

A szénciklus-modellek az éves kibocsátást összekapcsolják a légköri CO_2-készlet növekedésével. A modellek ugyan ellentmondásosak a szárazföldi és óceáni CO_2-megkötés mértékével kapcsolatban, de abban mind egyetértenek, hogy a CO_2-megkötés 1959 óta növekedésben van.

Bizonyítékok léteznek arra, hogy a szárazföldi felmelegedési adatokban megmutatkozó városi torzítást az éghajlati adatsorokból nem távolították el teljes mértékben.

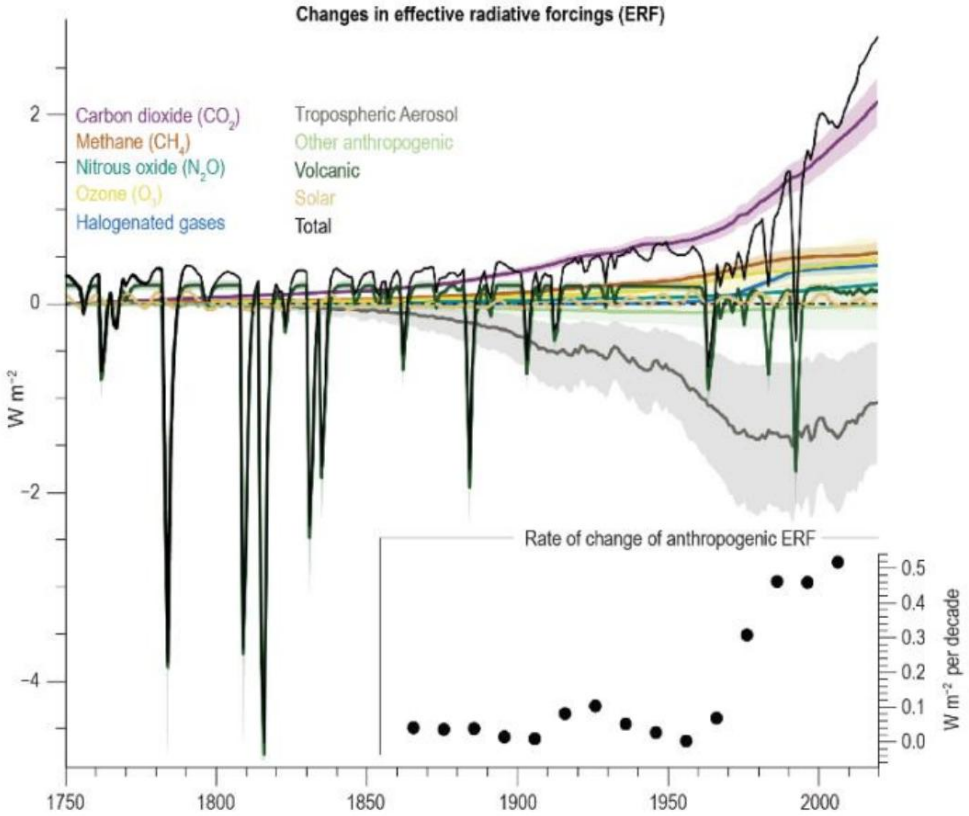
3.1 A sugárzási kényszer összetevői és történetük

3.1.1 Történelmileg ismert sugárzási kényszer

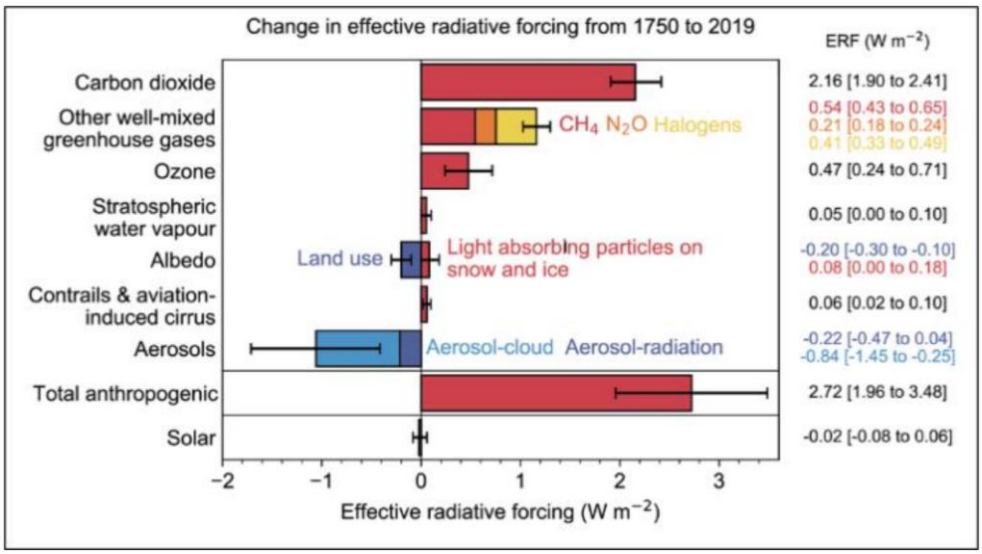
A Föld 4,6 milliárd éves történetében az éghajlatváltozás mindig is jellemző volt. A Föld hőmérséklete és időjárási mintázatai természetes módon változnak évtizedektől több millió évig terjedő időléptékben. A felszíni éghajlat természetes változásai kétféleképpen keletkeznek. A légkörben és az óceánban zajló cirkulációval összefüggő belső éghajlati ingadozások révén a légkör, az óceánok, a szárazföld és a jég között energia, víz- és széncsere zajlik. Az éghajlati rendszerre gyakorolt külső hatások közé tartoznak a Napból származó energia változásai és a vulkánkitörések hatásai. Az emberi tevékenységek a földhasználat és a föld befedése megváltoztatásával befolyásolják az éghajlatot. Az emberek a légkör összetételét is megváltoztatják a CO_2 és más üvegházhatású gázok kibocsátásával, valamint a légkörben lévő aeroszolrészecskék koncentrációjának változtatásával.

A Földet az elnyelt napfény melegíti, és az űrbe kisugárzott hő hűti. A Föld felszínén átlagolva ezek a folyamatok körülbelül 240 watt/négyzetméter (W/m^2) energiaáramlást jelentenek. Amikor egyensúlyban vannak, sem a felmelegedésnek, sem a lehűlésnek nincs nettó külső oka. Mind az emberi, mind a természetes éghajlati hatások megváltoztatják ezt az egyensúlyt, és így az éghajlat megváltozását okozzák.

A Föld légkörének tetején lévő energiaegyensúlyra gyakorolt hatásokat, azaz azt, hogy milyen mértékben keletkezik zavar a felmelegedés/lehűlés egyensúlyában, az ún. „sugárzási kényszer" számszerűsíti; a pozitív kényszer melegít, míg a negatív kényszer hűt. Az IPCC becsült adatai a sugárzási kényszer főbb összetevőinek 1750 óta tartó alakulásáról az AR6 itt bemutatott két ábráján látható.



3.1.1 ábra: A sugárzási kényszer összetevőire vonatkozó becslések időbeli változása. A satírozás a bizonytalansági határt jelzi. Forrás: AR6 WGI 2. fejezet, 10. ábra



3.1.2. ábra: A sugárzási kényszer összetevőinek változása 1750-től 2019-ig az IPCC szerint. Forrás: AR6 WGI 7. fejezet, 7-6. ábra

E grafikonok azt mutatják, hogy a teljes sugárzási kényszer természetes és antropogén összetevőkből tevődik össze. Az éghajlatot az ember leginkább a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával, a szén-dioxiddal befolyásolja. Melegítő hatást fejt ki azáltal, hogy csökkenti a légkör hűtőerejét. A CO_2-kibocsátás felhalmozódik a légkörben, amint azt a következő szakaszban ismertetjük, így a felmelegítő hatás erősödik. Egyéb üvegházhatású gázok (metán, dinitrogén-oxid, halogének és ózon) hasonlóan hatnak, így ezek együttesen a CO_2 által jelentett felmelegedésen túl

további 75 százalékkal járulnak hozzá. Az aeroszolok összességében hűtő hatást fejtenek ki, bár nagy a bizonytalanság abban, hogyan működnek közre katalizátorként a fényvisszaverő felhők kialakulásában. Ennek eredményeként a jelenkori felmelegedés okainak megértéséhez nemcsak a CO_2 melegítő hatásainak azonosítása szükséges, hanem az aeroszolok bizonytalanabb hűtő hatásainak beazonosítása is.

Az IPCC a Nap sugárzási kényszerének változását elhanyagolhatónak becsüli, mivel az iparosodás előtti idők óta a csekély szoláris változást feltételező adatrekonstrukciókat részesítik előnyben. Connolly et al. azonban (2021) a szakirodalomból az 1600-2000 közötti évekre vonatkozóan tizenhat különféle teljes napbesugárzási (TSI) rekonstrukciót gyűjtött össze; a rekonstrukciók a TSI alig változó állapotától egy viszonylag erősen emelkedő tendenciáig terjednek. A szerzők megjegyzik, hogy a TSI-változás és a felszínhőmérséklet-változás rekonstrukcióinak kombinációja lehetővé tesz olyan következtetéseket, amik azzal a feltételezéssel vannak összhangban, hogy a 20. századi felmelegedés egyáltalán nem tulajdonítható a Napnak, de olyat is, hogy nagyrészt a Napnak tulajdonítható.

Különösen nehéz kérdést vet fel a TSI 1989 és 1991 közötti adathiánya, amely egy megfigyelőeszköz felbocsátásának a Challenger űrrepülőgép 1986. január 28-i katasztrófája miatti késedelem folyománya. E késés megakadályozta, hogy a korábbit felváltó új műholdat idejekorán felbocsássák annak érdekében, hogy az előző rendszerrel időben átfedő adatokat szolgáltasson, és a két adatsort egymással hitelesíteni lehessen (Zacharias 2014, Scafetta et al. 2019). Ez az ún. ACRIM (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor) hézagprobléma. Az ugyanis, hogy van-e emelkedő tendencia a TSI-ben 1978 és 2018 között, attól függ, miként pótolják az ACRIM adathiányát. Connolly et al. (2021) megállapította, hogy az IPCC konszenzusos nyilatkozatait a napbesugárzási kényszerről az eltérő tudományos vélemények elnyomásával idő előtt fogalmazták meg.

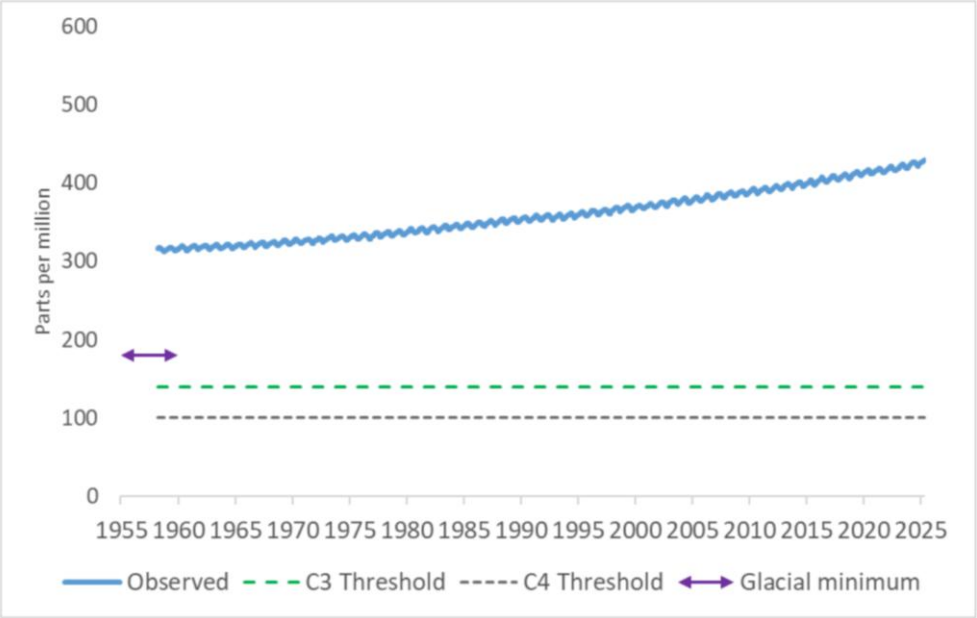
A sugárzási kényszer egy másik természetes összetevőjét az időnkénti hűtőhatást kifejtő vulkáni aeroszolok jelentik. Az IPCC AR6 jelentés 4.1. tudásdoboza a vulkánkitörések éghajlati hatásával foglalkozik, megemlítve három robbanásszerű vulkánkitörést, amelyek a 19. század első felében történtek. Ezek közé tartozott az 1815-ös Tambora-kitörés, ami a „nyár nélküli évet" eredményezte, és az északi féltekén számos terméskieséssel járt. Bizonytalanság van a 2022-ben kitört Hunga Tonga tengeralatti vulkán által jelentett viszonylag kis sugárzási kényszer előjelével kapcsolatban is (Jenkins et al., 2023, Schoeberl et al., 2024).

A 3.1.1. ábra azt mutatja, hogy a sugárzási kényszer antropogén összetevője 1900 előtt elhanyagolható volt, azóta pedig folyamatosan növekszik, mára közel 3 W/m^2-re emelkedett. Ez azonban még mindig csak körülbelül 1 százaléka a zavartalan sugárzási áramnak, ami megnehezíti az antropogén kényszer hatásának elkülönítését; a globális sugárzási energiaáramot a legmodernebb műholdakkal is csak néhány W/m^2 pontosságban lehet megbecsülni.

A vulkánkitöréseken és a teljes napsugárzáson (TSI) kívül a globális energiaegyensúlyban eltérést okozó egyéb természetes források ezeken a grafikonokon nem szerepelnek, mivel azok nagyrészt ismeretlenek.

3.1.2 A légköri CO_2-szint változása 1958 óta

A szén-dioxid felmelegítő hatása attól függ, hogy mennyi CO_2 többlet halmozódik fel a légkörben – azaz mennyivel haladja meg a koncentráció az iparosodás előtti 280 ppm-nyi értéket. A hawaii Mauna Loa obszervatóriumban megfigyelt CO_2-szint, amit általában reprezentatív globális átlagos koncentrációként használnak, online elérhető a https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html címen. A koncentráció a megfigyelés kezdetén, 1959-ben körülbelül 316 ppm volt, és most körülbelül 430 ppm, ami 36 százalékos növekedést jelent. A legutóbbi eljegesedési maximum végére a CO_2-szint körülbelül 180 ppm-re csökkent. Amint azt a 2. fejezetben tárgyaltuk, a C3 növények körülbelül 140 ppm alatti CO_2-szintnél, a C4 növények pedig 100 ppm alatti szinten kezdenek el pusztulni, így a CO_2-szint tovább csökkenése esetén a növényi élet veszélybe került volna.



3.1.3. ábra: A CO_2-koncentráció éves átlagértékének alakulása (1995-2025) ppm-ben, a Mauna Loa- megfigyelés szerint (kék). C3 küszöb: az a szint, ami alatt a C3 növények kezdenek elpusztulni (140 ppm, ld. 2. fejezet). C4 küszöb: Az a szint, ami alatt a C4 növények kezdenek elpusztulni (100 ppm, ld. 2. fejezet). Glaciális CO_2-minimumszint: a jelenlegi jégkorszak legkisebb CO_2-koncentrációja (lila nyíl). CO_2-adatforrás: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html.

3.2 Jövőbeni kibocsátási forgatókönyvek és a szénciklus

3.2.1 Kibocsátási forgatókönyvek

A jövőbeni ÜHG-kibocsátás veszélyeinek felméréséhez feltételezésekre van szükség arról, hogy mekkora lesz a kibocsátás. A jövőbeli kibocsátás, és így az emberi hatás az éghajlatra egyaránt függ a jövőbeni demográfiai változásoktól, a gazdasági tevékenységtől, a szabályozástól, valamint az energia- és mezőgazdasági technológiáktól. Az ezek mindegyikére vonatkozó egyes feltételezésekből következtetnek az üvegházgáz-kibocsátásra és légköri koncentrációjukra, az aeroszolkoncentráció és a földhasználat változások előrejelzéseire, amiket végső soron kombinálni lehet az antropogén sugárzási kényszerre vonatkozó feltételezésekkel.

A számos tényező mindegyikével kapcsolatos nagy bizonytalanság lehetetlenné teszi a jövőbeli kibocsátás pontos előrejelzését. Ehelyett az IPCC különféle forgatókönyv-készleteket használ. Ezeknek az a célja, hogy felöleljék a népesség, a gazdaság és a technológiák kézenfekvő lehetőségeinek széles skáláját. A forgatókönyvek legújabb verzióit egy szám jelöli, amely az adott forgatókönyv szerint 2100-ban várható antropogén sugárzási kényszert jelzi. Így a „6”-ossal jelölt forgatókönyv 6 W/m^2 ember által okozott sugárzási kényszernek (felmelegedésnek) felel meg a század végén. (Emlékezzünk vissza, hogy a jelenlegi antropogén sugárzási kényszer körülbelül 2,7 W/m^2.)

Bár az IPCC nem állítja, hogy kibocsátási forgatókönyvei előrejelzések, gyakran annak kezelik őket. A múltbeli forgatókönyv-csoportok és a megfigyelések összehasonlítása azt mutatja, hogy az IPCC kibocsátási előrejelzései hajlamosak voltak túlbecsülni a tényleges későbbi kibocsátásokat. Az IPCC harmadik és negyedik értékelő jelentéséhez a kibocsátási forgatókönyvekről szóló különjelentésből származó kibocsátási előrejelzések halmazát használták; ezeket SRES-forgatókönyveknek nevezték. McKittrick et al. (2012) kimutatták, hogy az egy főre jutó értékekre átszámítva a SRES-forgatókönyv kibocsátás-eloszlása a megfigyelt trendekhez képest felfelé torzít. A

SRES-forgatókönyvek torzítását megerősítette Hausfather et al. (2019) későbbi elemzése is. Ők azt mutatták ki, hogy a megfigyelt légköri CO_2-koncentráció a SRES-tartomány, valamint a későbbi IPCC-forgatókönyvek tartományainak alsó határát követték (3.2.1. ábra).

Az AR5-höz az IPCC egy új forgatókönyv-készletet dolgozott ki, amelyet reprezentatív koncentrációs útvonalaknak (RCP) neveznek. Ezeket egy olyan számmal azonosították be, amely a kényszererő növekedését jelenti, és így nevezték el őket RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 és RCP8.5 néven. Az RCP2.6 (amely 2100-ban 2,6 W/m^2 antropogén sugárzási kényszert jelent) egy olyan üvegházhatású gázkoncentrációs útvonalat ír le, ami jóval 2°C alatti felmelegedéshez vezet. A skála másik végén az RCP8.5 egy szélsőséges eredmény, ami 1900 és 2100 között közel 5°C-os felmelegedést jelent.

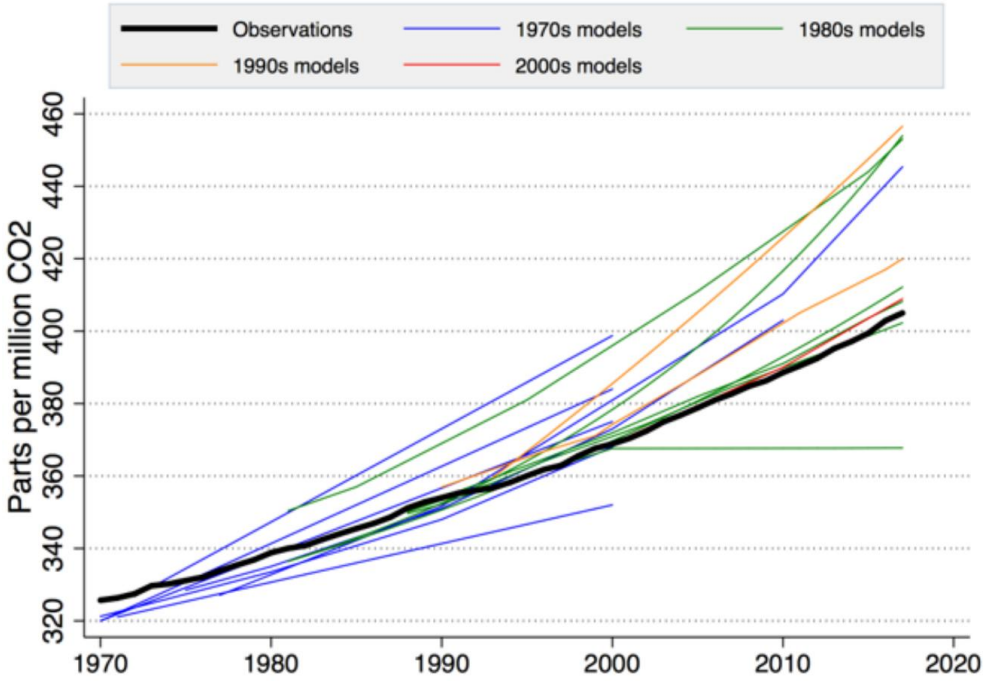
Mind a tudományos irodalomban, mind a népszerű médiában az RCP8.5-öt kezdték a klímapolitika nélküli, vagyis a „szokásos üzletmeneti" forgatókönyvként emleget. Ezért használták fel egy olyan referenciaeredmény generálására, amely az állítás szerint egy egyre szigorúbb kibocsátáscsökkentési politika nélküli 21. századi világot jelenít meg. Az RCP8.5 forgatókönyvet azonban egy alacsony valószínűségű, magas kibocsátású forgatókönyvnek szánták, és a szokásos üzletmenet alapjául szolgáló forgatókönyvként való használatát súlyosan félrevezetőnek minősítették.[1] Hausfather és Peters (2020a) a Nature folyóiratban megjelent kommentárjukban rámutattak, hogy az RCP8.5 forgatókönyvet egy szélsőségesen legrosszabb esetként dolgozták ki, és a „szokásos üzletmenet" alapjául való helytelen használata számos félrevezető tanulmányhoz és médiabeszámolóhoz vezetett.

Az RCP8.5 forgatókönyv valószínűtlenségét Burgess et al. (2021) részletes vizsgálatnak vetette alá. Az RCP8.5 valószínűtlenségét nem szabad *nagyon valószínűtlennek* (pl. ún. 95. percentilisnek) vagy „legrosszabb esetnek" tekinteni, hanem inkább valóban valószínűtlennek, mivel a 8,5 W/m^2-es kényszerhez szükséges bemenetek igen valószínűtlenek. [Az adatok százalékos eloszlásában elfoglalt helyzet, azaz a percentilis alapján értelmezhetetlen esetről van szó. (ford.)]. Megjegyezték, hogy az RCP8.5 máris eltért az energiafelhasználás megfigyelt trendjétől, és a közeli jövőre vonatkozó trend élesen különbözik a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) trendjétől, ami az elkövetkező évtizedekre piaci alapú energiafelhasználási előrejelzéseket ad. Pielke Jr. et al. (2022) kimutatta továbbá, hogy az IEA történelmi és előrejelzési trendjei az alján helyezkednek el mind az RCP-előrejelzések, mind a frissebb Megosztott Társadalmi-gazdasági Útvonal (SSP) forgatókönyv alsó burkológörbéinek.

Schwalm et al. (2020) azzal védték az RCP8.5 használatát, hogy a 2005–2020 közötti kumulatív CO_2-kibocsátás inkább követi ezt, mint az alacsonyabb RCP-forgatókönyveket. Azt is állítják, hogy az elkövetkező évtizedekben az IEA-forgatókönyvek módosított változata szorosan követi az RCP8.5-öt. Hausfather és Peters (2020b) válaszukban azt mondták, hogy az RCP8.5 képessége az említett 15 évben az üzemanyag-felhasználásból és a földhasználat-változásból eredő CO_2-reprezentációban előforduló hibák eltüntetésének következménye, és az IEA-val való látszólagos egyezés az elkövetkező évtizedekben Schwalm et al. érdeme, akiknek a földhasználati kibocsátásra túl magas járulékos tényezőt vezettek be. Az IEA saját előrejelzett CO_2-kibocsátása jóval alatta marad az RCP8.5-nek.

Az RCP8.5 széles körű, szakpolitikai kiindulási alapként való használata aggodalomra okot adó tendenciát teremtett az éghajlatváltozás hatásaival foglalkozó szakirodalomban. A probléma mértékét Pielke Jr. és Ritchie (2020) szakirodalmi elemzése is megerősítette. Megállapították, hogy 2010 és 2020 között mintegy 16 800 tudományos cikk alkalmazta az RCP8.5 forgatókönyvet, amelyek közül körülbelül 4500 az „üzletmenet a szokásos módon" koncepciójához kötötte az RCP8.5-öt. Elemzésük kimutatta, hogy az RCP8.5-öt nemcsak az egyes kutatók használták rosszul, hanem olyan befolyásos tudományos ügynökségek is visszaéltek az RCP8.5-tel, mint az IPCC és az Egyesült Államok Nemzeti Éghajlatváltozási Értékelése (USNCA). Mindez a fősodratú médiában azon nyomban félrevezető tudósításokhoz vezetett.

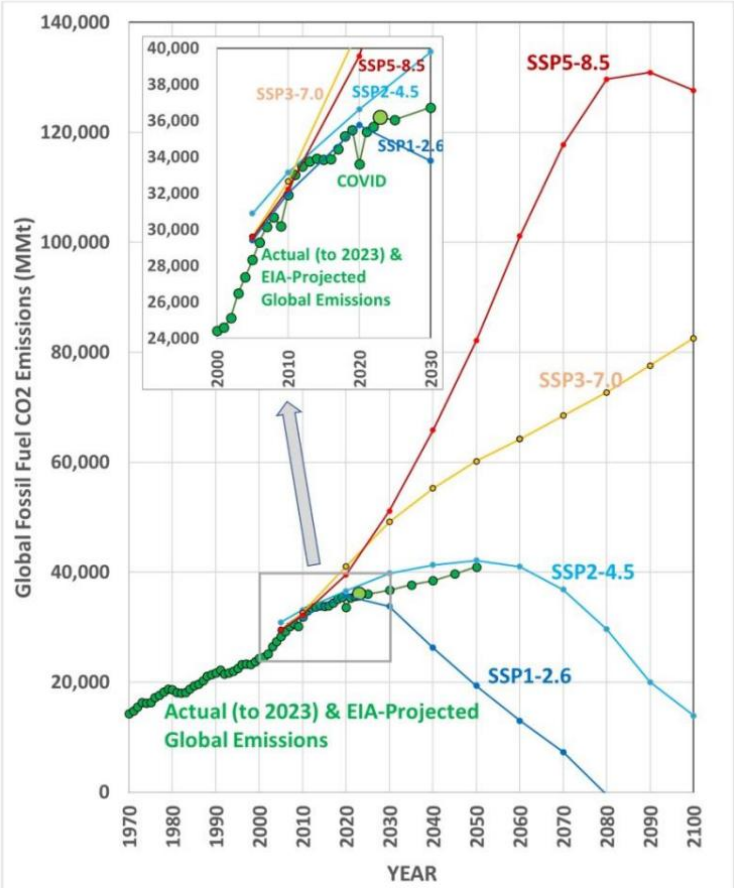
[1] Ez a szélsőséges forgatókönyv hasznos a modellezők számára, ugyanis ha a kényszerítő tényező nagy, az nagy választ (felmelegedést) generál, ami megkönnyíti a modell érzékenységének felmérését. De ez egészen más, mint azt állítani, hogy ez egy valószínű jövőbeli kimenetel.



3.2.1 ábra: Az 1970-es évek óta az kibocsátásra és a koncentrációra vonatkozó, egymást követő előrejelzések (színes vonalak) következetesen túlbecsülték a méréseket (fekete vonal). Forrás: Hausfather et al. (2019) S4. ábra

Pielke és Ritchie (2020) arról számoltak be, hogy az RCP8.5-öt használó új tanulmányok száma napi 20 volt, amelyek közül körülbelül napi kettő kifejezetten összekötötte az RCP8.5-öt és a „szokásos üzletmenetet". Arra a következtetésre jutottak, hogy a klímakutató közösség egy teljes évtizedet eltöltött azzal, hogy „tudományos erőforrásokat sci-fi-íráűsokra fordított", és emiatt „a tudományos szakirodalom apokaliptikus irányban kiegyensúlyozatlanná vált".

Az IPCC új forgatókönyveket dolgozott ki az AR6-hoz, a „Megosztott társadalmi-gazdasági út" (SSP) forgatókönyveket, amelyekben az RCP és SRES forgatókönyvekben mutatott torzítás tovább folytatódott. A 3.2.2. ábra a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) által összeállított teljes globális megfigyelt CO_2-kibocsátást mutatja, egyesítve az EIA kibocsátási előrejelzésével, figyelembe véve az energiafelhasználási előrejelzéseket és a jelenlegi politikákat. A többi vonal az IPCC SSP-forgatókönyveinek tartományát (SSP1-SSP5) mutatja. 2023-tól a globális CO_2-kibocsátás jóval az SSP7.0 alatt maradt, sőt az SSP2-4.5-nek is alá került.



3.2.2. ábra: Megfigyelt és előrevetített CO_2-kibocsátás. Forrás: IPCC (SSP szcenáriók) és Energy Information Administration (EIA). Zöld: megfigyelt történelmi kibocsátás és az EIA előrejelzése. Egyéb vonalak: SSP1-5. Adatforrás: Friedlingstein et al. (2024).

3.2.2 A kibocsátásokhoz és a koncentrációkhoz kapcsolódó szénciklus

A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből (valamint kisebb mértékben az erdőirtásból és a cementgyártásból) származó szén-dioxid-kibocsátás a légkör CO_2-koncentrációjának folyamatos emelkedéséhez vezetett, amint azt a 3.1.3. ábra mutatja. A kibocsátások és a koncentráció közötti kapcsolatot a szárazföldi és óceáni folyamatok globális szénciklusa határozza meg, amelyek során a légkörrel széncsere történik. E folyamatok megértéséhez Crisp et al. (2021) segített hozzá.

A Föld légkörében körülbelül 850 Gt szén (GtC) található[2], szinte teljes egészében CO_2 formájában. Ebből a szénből a biológiai folyamatok (növényi növekedés és -lebomlás) és a fizikai folyamatok (óceáni abszorpció és gázkibocsátás) évente körülbelül 200 GtC-t cserélnek ki a Föld felszínével (nagyjából 80 GtC-t a kontinensekkel és 120 GtC-t az óceánokkal). Mielőtt az emberi tevékenység jelentőssé vált, a légkörből való kivonódás nagyjából egyensúlyban volt a hozzáadódással.

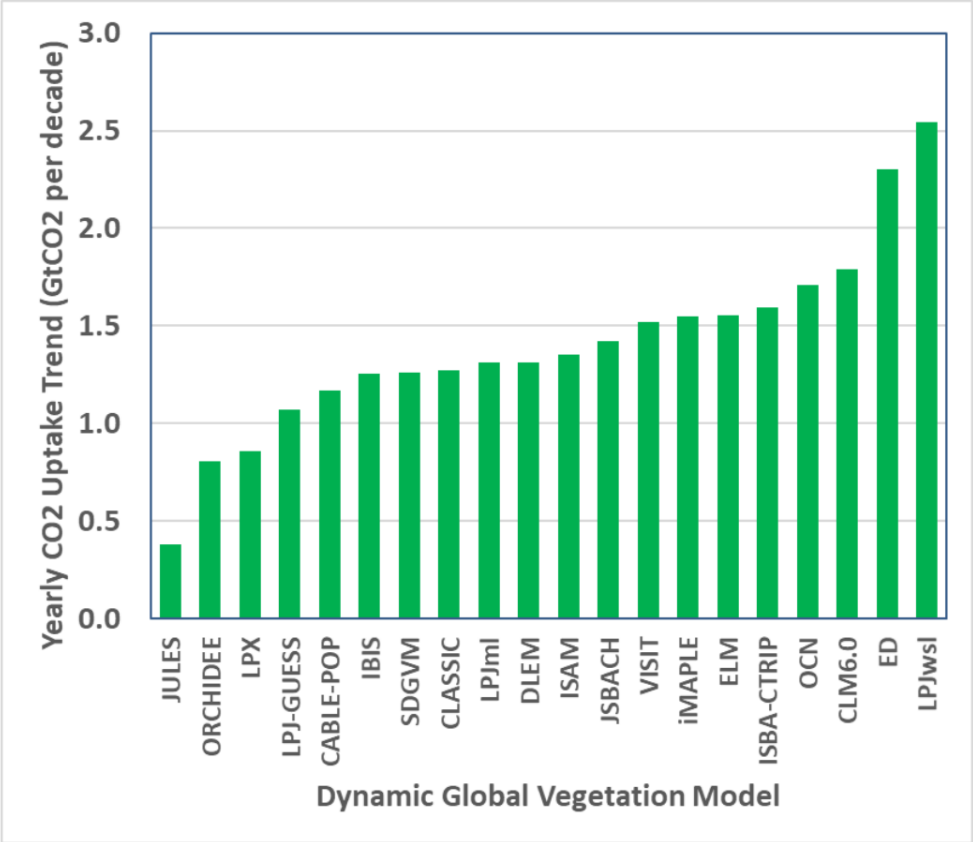
A fosszilis tüzelőanyagok (szén, olaj és gáz) elégetése azonban kivonja a szenet a talajból, és hozzáadja azt a légkörrel történő évi cseréhez. Ez a többlet (a cementgyártás sokkal kisebb hozzájárulásával együtt) 2023-ban 10,3 GtC-t tett ki, ami a légkörrel végbement éves csere mindössze 5 százaléka.

[2] Mivel a CO_2 a szénciklus során kémiailag átalakul, kényelmesebb a CO_2 molekulái helyett a szénatomokat nyomon követni. Egy gigatonna szén (GtC) körülbelül 3,7 Gt CO_2-nek felel meg.

A szénciklus az emberiség kis éves szén-dioxid-befecskendezésének körülbelül 50 százalékát teszi ki azáltal, hogy azt a növények növekedése és az óceáni felvétel természetes módon megköti, míg a fennmaradó rész felhalmozódik a légkörben (Ciais et al., 2013). Emiatt a légköri CO_2-koncentráció éves növekedése átlagosan csak körülbelül a fele annak, amit az emberi kibocsátásokból naivan várnánk. A légkör jövőbeli CO_2-koncentrációjának, és így az éghajlatra gyakorolt jövőbeli emberi hatásoknak az előrejelzéséhez fontos tudni, hogy a jövőben miként változhat a szénciklus. Az 50 százalékos arány történelmileg közel állandósága azt jelenti, hogy minél több CO_2-t termelt az emberiség, annál gyorsabban távolította el a természet a légkörből. Ez az 50 százalékos arány az El Niño, a La Niña és a változó időjárási mintázatok okozta természetes szénciklus-egyensúlyhiányok miatt évről-évre némileg változik. A Pinatubo-hegy 1991-es kitörése után a légköri CO_2 mennyisége is jelentősen csökkent, ami egy érdekes eredmény, és ezidáig még nem sikerült megmagyarázni (Angert et al., 2004). A légkörből a felesleges CO_2-t eltávolító fő folyamatok közé tartozik a szárazföldi növényzet fokozott növekedése (különösen a magas földrajzi szélességeken), a talaj szénmegkötésének némi növekedése, valamint az óceán általi CO_2-felvétel a légköri CO_2 parciális nyomásának növekedése miatt az óceánban oldott CO_2 nyomásához képest. A Globális Szén Projekt (Friedlingstein et al., 2024) által nyomon követett mind a húsz szárazföldi szénciklus-modell azt mutatja, hogy a szárazföldi folyamatok 1959 óta egyre növekvő ütemben vonják el a felesleges CO_2-t. Ez összhangban van az 1982 óta műholdakkal megfigyelt „globális zöldülés” jelenségével (2.1. fejezet). Míg a szárazföldi növényzet pozitívan reagál a légköri CO_2-többletre, az óceáni biológiai folyamatok általi többlet CO_2-felvétele túl bizonytalan ahhoz, hogy megbízhatóan mérhető legyen. Az itt leírt ismeretek és számos további szénciklus-folyamat leírása Crisp et al. (2021) összefoglalójában található.

CO_2-felvétel szárazföldi folyamatok által

A légkörből származó többlet CO_2 szárazföldi felszíni folyamatok általi felvételét (ahogyan azt a globális zöldülésből is következtetjük) 20 különféle dinamikus globális vegetációs modellel modellezték, amelyek eredményeit a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. Amint a 3.2.3. ábrán is látható, ezek a modellek egyetértenek abban, hogy a növényzet és a talaj megkötik a szenet a légkörből. Azt is látjuk azonban, hogy az 1959 és 2023 közötti (65 év) hosszú távú trendekben a modellek nagymértékben (közel hétszeres szorzótényezővel) különböznek egymástól. Mindez azt mutatja, hogy továbbra is jelentős bizonytalanság van abban, hogy a szárazföldi folyamatok milyen gyorsan távolítják el a CO_2-t a légkörből, ami viszont bizonytalanságot szül a jövőbeli légköri CO_2-koncentrációt illetően, ami pedig bizonytalanná teszi a jövőbeli éghajlatváltozás klímamodell-szimulációit is.

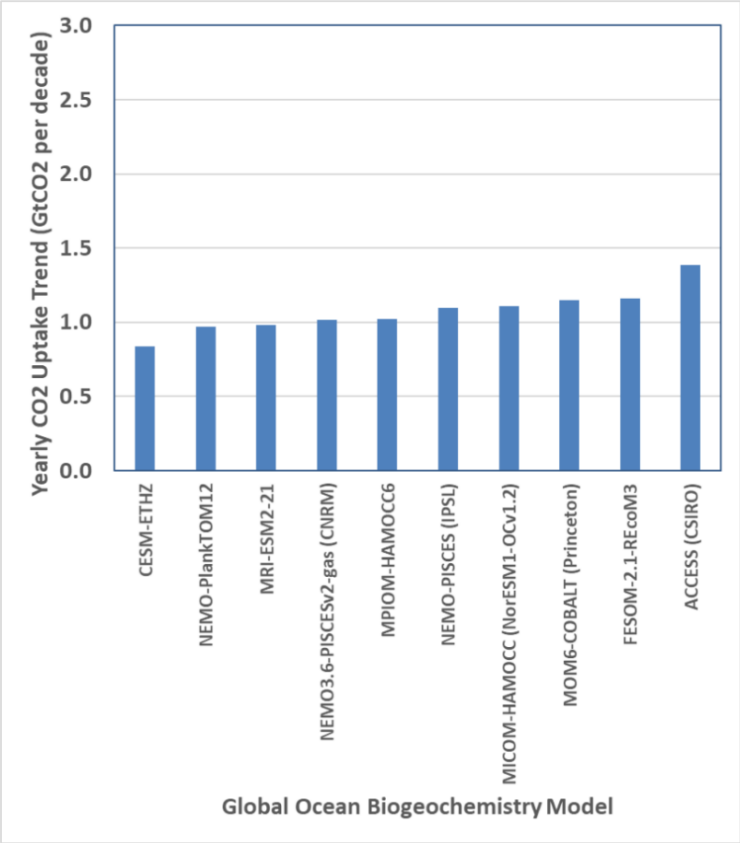


3.2.3 ábra: Szárazföldi folyamatok általi éves CO_2-felvétel ($GtCO_2$/év) 1959-2023 között, 20 különféle dinamikus globális vegetációmodell, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

CO_2-felvétel óceáni folyamatok által

Az óceáni folyamatok légkörből történő többlet CO_2-felvételét 10 különböző óceáni biogeokémiai modell segítségével modellezték. Az eredményeket a Globális Szén Projekt (Friedlingstein, 2024) minden évben frissíti. A szárazföldi modellek eredményeihez hasonlóan az összes óceáni modell egyetért abban, hogy a globális óceánok 1959 és 2023 között egyre nagyobb ütemben vontak ki szenet a légkörből (3.2.4. ábra). A szárazföldi modellekkel ellentétben azonban az óceáni modellek sokkal jobb egyezést mutatnak egymással, a leggyorsabban növekvő CO_2-felvételt produkáló modell mindössze 65 százalékkal gyorsabb, mint a leglassabban növekvő CO_2-felvételt produkáló modell. A modellek közötti relatív egyezés ellenére Friedlingstein et al. (2022) megjegyzi, hogy az elmúlt évtizedben jelentős eltérés mutatkozik a különböző módszerek között az óceáni elnyelődés erősségét illetően, különösen a Déli-óceánon (az Antarktiszi-óceánon).

Megjegyzendő, hogy a 3.2.3. ábrán látható összes szárazföldi modellben a CO_2-felvétel átlagos trendje 25 százalékkal nagyobb, mint az óceáni felvétel átlagos trendje. Ez arra utal, hogy a szárazföldi folyamatok gyorsabban képesek a levegőből eltávolítani a CO_2-t, mint az óceáni folyamatok.



3.2.4 ábra: Az éves CO_2-felvétel ($GtCO_2$/év) az óceáni folyamatok által 1959-2023 között, 10 különféle dinamikus globális biogeokémiai modell, valamint a Globális Karbon Projekt (GCP) rendszeresen közzétett adatai alapján (Friedlingstein, 2024).

3.3 Az urbanizáció hatása a hőmérsékleti trendekre

A szárazföldi történelmi hőmérsékleti adatokat főként ott gyűjtötték, ahol emberek élnek. Ez felveti azt a problémát, hogy hogyan lehet kiszűrni a városi hőszigetek (UHI) és a kontinensfelszín egyéb változásai miatt jelentkező nem éghajlatváltozás-eredetű felmelegedési jeleket. Ha ezeket nem távolítják el, az adatok túlzott mértékben tulajdoníthatják üvegházhatású gázoknak a megfigyelt felmelegedést. Az IPCC elismeri, hogy a nyers hőmérsékleti adatok UHI-hatásokkal szennyezettek, de azt állítja, hogy rendelkeznek olyan adattisztítási eljárásokkal, amelyek ezeket eltávolítják. Nyitott kérdés, hogy ezek az eljárások megfelelőek-e.

Az AR6 elbagatellizálta ezt a problémát azzal (WGI 235. o.), hogy nem merült fel újabb bizonyíték, amely megváltoztatná az AR5 megállapítását, miszerint az urbanizáció a globális szárazföldi felszín felmelegedési trendjében legfeljebb 10 százalékos felfelé irányuló torzítást okoz. Az AR5 (WGI 189. o.) szintén a 10 százalékos felső határt idézte, forrásmegjelölés nélkül. Az AR4 (WGI 244. o.) az állítás alapjául Jones et al. (1990) és Peterson et al. (1999) munkáira hivatkozott. Peterson et al. nem találtak különbséget a vidéki és a városi minták közötti trendekben, bár a „vidék”-re vonatkozó definíciójuk az volt, hogy a lakosság száma legfeljebb 10 000 fő, míg az urbanizáció relatív hatása jóval ez alatt elkezdődik (Spencer et al., 2025). Jones et al. a vidéki/városi felmelegedést három régióban hasonlította össze: Kelet-Ausztráliában, Kelet-Kínában és a Szovjetunió nyugati részén. „Vidék” definíciójuk a volt Szovjetunióban legfeljebb 10 000 lakosság volt, míg Kínában legfeljebb 100 000. Ezeken a területeken 10 százaléknál nagyobb relatív felmelegedési torzítást találtak, de azt feltételezték, hogy az általuk nem vizsgált területek átlagolt urbanizációs hatása a globális szárazföldi torzítást a megfigyelt felmelegedési trend 10 százaléka alá csökkentené.

Az IPCC AR4 előtt számos tanulmány jelent meg nyomtatásban, amelyek azt állították, hogy az UHI-k felmelegedési hatása a megfigyelt felmelegedéshez viszonylag nagy (30–50%-os) hozzájárulást adott, és ez a klímamodell-szimulációkból kimaradt (de Laat és Maurellis 2006, McKitrick és Michaels 2007). Ezek az eredmények a szárazföldi maximális felmelegedés helyszínei és a maximális társadalmi-gazdasági fejlődés helyszínei közötti korreláción alapultak. Az AR4 jelentés (244. o.) azt állította, hogy ez a korreláció a természetes légköri cirkuláció következménye, és valójában statisztikailag jelentéktelen, és ezen az alapon eltekintett az eredmények figyelembevételétől. Ez az állítás vitatható, mivel nem mutattak fel semmiféle bizonyítékot. McKitrick (2010), valamint McKitrick és Nierenberg (2010) kimutatták, hogy a korrelációra vonatkozó különféle alternatív magyarázatok nem befolyásolják a korreláció jelentőségét. Az AR5 jelentés (189. o.) elismerte, hogy az AR4 „nem szolgáltatott explicit bizonyítékot" az értékeléshez, és ezen dokumentumok alapján elismerte, hogy „jelentős bizonyíték van az adatok ilyesféle szennyeződésére", azaz a szárazföldi adatokban felmelegedési torzításra utal. Azonban, ahogy már említettük, az AR5 jelentés többi részében fenntartották az AR4 állítását, miszerint ez a megfigyelt felmelegedés kevesebb mint 10 százaléka. Továbbá nem adtak figyelmeztetést a szárazföldi adatok éghajlati mérésekre való felhasználásával kapcsolatban, annak ellenére, hogy elismerték az UHI szennyeződés bizonyítékait. Nemrégiben Soon et al. (2023) azt becsülte, hogy az északi félteke szárazföldi hőmérsékletváltozási adataiban az 1850–2018 közötti urbanizációs torzítás elegendő volt ahhoz, hogy a kevert (városi+ vidéki) adatok trendje évszázadonként 0,55°C-ról 0,89°C-ra növekedjen.

Néhány, az UHI szennyezés ellen bizonyítékot nyújtó tanulmány összehasonlította a vidéki és városi helyszínek felmelegedési ütemét (Jones et al. 1990, Peterson et al. 1999, Wickham et al. 2013). Nem ismert, hogy az efféle módszerek képesek lennének-e kimutatni az UHI torzítást akkor is, ha az jelen van. Az UHI felmelegedés hatása a népesség függvényében logaritmikusan viselkedik, más szóval kis népsűrűség esetében a legerősebb, majd a helyi urbanizáció kiterjedésével egyenletesebb lesz (Oke 1973, Spencer et al. 2025). Ezért az, hogy nem találtak különbséget a városi és vidéki állomások felmelegedési ütemében, nem bizonyítja az UHI szennyezés hiányát. McKitrick (2013) empirikus bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy a vidéki/városi trend egy olyan adathalmazban, amelyről más alapon kimutatták, hogy UHI torzítással szennyezett, nem különbözik szignifikánsan egymástól.

Parker (2006) városi helyszínekből vett minták vizsgálatával a trendekben nem talált eltérést az éjszakai szélsebesség szerint felosztott részhalmazok között, és ennek alapján arra a következtetésre jutott, hogy az urbanizáció nem lehet szignifikáns tényező. Itt ismét az a kérdés, hogy egy ilyen módszer kimutatná-e az UHI torzítását, még ha jelen is lenne. McKitrick (2013) bemutatott egy olyan példát, amelyben az UHI-val szennyezett adatok nem mutattak szignifikáns trendkülönbségeket a szélsebesség szerinti csoportosítás alapján.

Az UHI torzítás mérésének kihívása az, hogy a helyi hőmérsékletváltozást a népesség vagy az urbanizáció megfelelő változásához kellene kötni, és nem egy statikus osztályozási változóhoz, például ahhoz, hogy vidéki vagy városi. Spencer et al. (2025) egy ilyen elemzés elvégzéséhez újonnan elérhető történelmi népességi archívumokat használt fel, és az amerikai nyári hőmérsékleti adatokban jelentős UHI torzítására talált bizonyítékot.

Összefoglalva: a szárazföldi hőmérsékleti megfigyelésben ugyan egyértelműen kimutathatóak felmelegedésből adódó változások, arra is utalnak bizonyítékok, hogy az urbanizációs mintázatok e tendenciát felfelé torzítják, és hogy ezeket a torzításokat az éghajlati adatkészletek előállításához használt adatfeldolgozó algoritmusok nem szüntették meg teljesen.

Hivatkozások

Angert, A., S. Biraud, Bonfils, C., Buermann, W. and I. Fung (2004). CO_2 seasonality indicates origins of post-Pinatubo sink. Geophysical Research Letters 31. https://doi.org/10.1029/2004GL019760

AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2013) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2007) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

Burgess, Matthew et al (2021) Environmental Research Letters 16 014016 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abcdd2/meta

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin,et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M.

Tignor,et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Connolly, Roman, Willie Soon, Michael Connolly et al. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate Research in Astronomy and Astrophysics 21(6) doi: 10.1088/1674-4527/21/6/131 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131

Crisp, David & Dolman, Han (A.J.) & Tanhua, Toste & Mckinley, Galen & Hauck, Judith & Bastos, Ana & Sitch, Stephen & Eggleston, Simon & Aich, Valentin. (2022). How Well Do We Understand the Land-Ocean-Atmosphere Carbon Cycle?. Reviews of Geophysics. 60. 10.1029/2021RG000736.

De Laat, A.T.J., and A.N. Maurellis (2006), Evidence for influence of anthropogenic surface processes on lower tropospheric and surface temperature trends, International Journal of Climatology 26:897—913.

Friedlingstein, P., and 95 co-authors (2024): Global Carbon Budget 2024, Earth System Science Data 14(4), https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519

Hausfather et al. (2019) “Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections” Geophysical Research Letters 47(1) https://doi.org/10.1029/2019GL085378

Hausfather, Z. and G. Peters (2020a) “Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading” Nature 29 January 2020 https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3

Hausfather, Z. and G. Peters (2020b) RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. Proceedings of the National. Academy of Sciences 117, 27791–27792 (2020)

Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. Nature Climate Change. 13, 127–129 (2023). https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2

Jones, P. D., P. Y. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang, and T. R. Karl (1990), Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, Nature, 347, 169 – 172

Liu, Pengfei et al. (2021) “Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere” Science Advances 7(22) May 2021 https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379

McKitrick, R.R. and P.J. Michaels (2007), Quantifying the influence of anthropogenic surface processes and inhomogeneities on gridded global climate data, Journal of Geophysical Research, 112, D24S09, doi:10.1029/2007JD008465.

McKitrick, Ross R. (2010) Atmospheric Oscillations Do Not Explain the Temperature-Industrialization Correlation. Statistics Politics and Policy Vol 1. No. 1., July 2010

McKitrick, Ross R. (2013) Encompassing Tests of Socioeconomic Signals in Surface Climate Data. Climatic Change doi 10.1007/s10584-013-0793-5. Volume 120, Issue 1-2. http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-013-0793-5

McKitrick, Ross R. and Nicolas Nierenberg (2010) Socioeconomic Patterns in Climate Data. Journal of Economic and Social Measurement, 35(3,4) pp. 149-175. DOI 10.3233/JEM-2010-0336

McKitrick, Ross R., Mark Strazicich and Junsoo Lee (2012) "Long-Term Forecasting of Global Carbon Dioxide Emissions: Reducing Uncertainties Using a Per-Capita Approach." Journal of Forecasting, Vol 32, Issue 5, pp 435-451 DOI: 10.1002/for.2248.

Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island, Atmospheric Environment 7, 769-779

Parker, D.E. (2006) "A Demonstration that Large-Scale Warming is not Urban." Journal of Climate 19:2882—2895.

Peterson, Thomas C., Kevin P. Gallo, JayLawrimore, Timothy W. Owen, Alex Huang, David A. McKittrick (1999) Global rural temperature trends. Geophysical Research Letters February 1999 https://doi.org/10.1029/1998GL900322

Pielke Jr., Roger and Ritchie, Justin (2020) "Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment" Social Sciences Research Network April 2020, available at: https://ssrn.com/abstract=3581777

Pielke Jr, R., Burgess, M. G., & Ritchie, J. (2022). Plausible 2005-2050 emissions scenarios project between 2 and 3 degrees C of warming by 2100. Environmental Research Letters 17 024027 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac4ebf/pdf

Scaffeta, Nicola, Richard C. Willson, Jae N. Lee and Dong Wu (2019) Modeling Quiet Solar Luminosity Variability from TSI Satellite Measurements and Proxy Models during 1980–2018. Remote Sensing 11(21) 2569 https://doi.org/10.3390/rs11212569

Schoeberl, M.R., Y. Wang, G. Taha, D.J. Zawada, R. Ueyama and A. Dessler, 2024. Evolution of the climate forcing during the two years after the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. Journal of Geophysical Research., 129.

Schwalm, C.R., S. Glendon, P. B. Duffy (2020) RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 117, 19656–19657 (2020). Soon,W.; Connolly, R.; Connolly, M.; Akasofu, S.-I.; Baliunas, S.; et al. (2023) The Detection and Attribution of Northern Hemisphere Land Surface Warming (1850–2018) in Terms of Human and Natural Factors: Challenges of Inadequate Data. Climate 2023, 11, 179. https://doi.org/10.3390/cli11090179

Spencer, Roy W, John R Christy and William D. Braswell (2025) Urban Heat Island Effects in U.S. Summer Surface Temperature Data, 1895–2023 Journal of Applied Meteorology and Climatology April 2025 https://doi.org/10.1175/JAMC-D-23-0199.1

Wickham C, R Rohde , RA Muller, J Wurtele, J Curry, et al. (2013) Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average using Rural Sites Identified from MODIS Classifications. Geoinformatics and Geostatistics: An Overview 1:2.

Zacharias, Pia (2014) An Independent Review of Existing Total Solar Irradiance Records. Surveys in Geophysics 35 pp. 897—912 https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-014-9294-y

II. RÉSZ: A CO_2-KIBOCSÁTÁSRA ADOTT KLÍMAVÁLASZ

4 A CO_2-KÉNYSZER KLÍMAÉRZÉKENYSÉGE

Fejet-összefoglaló

Egyre erősödik az a felismerés, miszerint a klímamodellek alkalmatlanok az emelkedő CO_2-koncentráció hatására fellépő ún. egyensúlyi klímaérzékenység (ECS) meghatározására. Az IPCC adatalapú megközelítések felé fordult, beleértve a történelmi adatokat és a paleoéghajlati rekonstrukciókat, de ezek megbízhatóságát adathiányok korlátozzák.

Az adatalapú klímaérzékenység (ECS) értékek általában alacsonyabbak, mint a klímamodellekből származók. Az IPCC AR6 az ECS valószínű tartományára vonatkozóan felső határként 4,0°C-ot ad meg, ami alacsonyabb, mint az AR5 4,5°C-os értéke. Úgy tűnik, hogy a felső határ csökkentését a paleoéghajlati adatok kellően alátámasztják. Az AR6 alsó határa az ECS valószínű tartományára vonatkozóan 2,5°C, ami lényegesen magasabb, mint az AR5 1,5°C-os értéke. Az alsó határ emelése kevésbé indokolt; az AR6 óta előkerült bizonyítékok szerint a *valószínű* tartomány alsó határa 1,8°C körüli értékre tehető.

4.1 Bevezetés

Az éghajlat emelkedő CO_2-koncentrációra adott válaszának nagysága az antropogén klímaváltozásról szóló tudományos vitában, így a „klímapolitikai fellépésről" szóló nyilvános vitában is központi szerepet játszik. Ennek a válasznak a legegyszerűbb mértéke a globális átlagos felszínhőmérséklet emelkedése, amelyet az Egyensúlyi Klímaérzékenység (ECS) számszerűsít. Az ECS-t a CO_2 iparosodás előtti 280 ppm-es koncentrációjához képesti megduplázódására várható felmelegedés mértékeként definiálják, miután minden klímakomponensnek volt ideje az alkalmazkodásra. Egyes összetevők, mint például az alsó légkör (troposzféra) hőmérséklete, gyorsan alkalmazkodnak, míg más összetevők alkalmazkodása, például a mélyóceáné és a krioszféraáé, akár évszázadokig is eltarthat. A rövidebb időléptékeket jobban leírja egy kapcsolódó mérőszám, az Átmeneti Klímaválasz (TCR); definíció szerint ez annak a felmelegedésnek a mértéke, amikor a CO_2-koncentráció úgy megduplázódik meg, hogy 70 éven keresztül évi egy százalékkal emelkedik.

Az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos Akadémiája számára 1979-ben készült Charney-jelentés (National Research Council 1979) azt javasolta, hogy a legvalószínűbb ECS 3,0 ± 1,5°C legyen. Az IPCC ismételten megerősítette ezt a tartományt, csak kisebb eltérésekkel, egészen a legutóbbi, 6. számú jelentéséig. Az 5. számú jelentés 1,5–4,5 °C-ot jelölt meg valószínű tartományként (66 százalékos valószínűséggel), továbbá kijelentette: rendkívül valószínűtlen, hogy az ECS (95 százalékos valószínűséggel) 1,0 °C alatt legyen, és nagyon valószínűtlen (90 százalékos valószínűséggel), hogy meghaladja a 6,5 °C-ot.

Az ECS bizonytalansága makacsul nagy maradt, annak ellenére, hogy számos egyedi tanulmány a szűkítését állította (Hausfather 2023). Legutóbb a 6. számú jelentés *a valószínű tartományt* 2,5–4,0 °C-ra szűkítette, és a *nagyon valószínű tartományt* 2,0–5,0 °C-nak tekintette. Ez az alsó tartománybeli szűkítés vitatott, amint azt alább tárgyaljuk.

Az ECS bizonytalanságai a politikai döntéshozatal szempontjából nagy jelentőséggel bírnak. Amint azt a 11. fejezetben tárgyaljuk, a gazdasági modellek a CO_2-kibocsátás költségeinek előrejelzésére az ECS értékeit használják. A hagyományos érték (3,0 °C) a CO_2-kibocsátás tekintetében jellemzően szerény globális társadalmi költségekkel járt, ami elegendő volt bizonyos politikai intézkedések igazolására, de ezeket többnyire a század későbbi szakaszára halasztották. Ha az ECS nagyon magas (4,5 °C felett), akkor sürgetőbbé válik az azonnali agresszív kibocsátás-szabályozás, míg 2,0 °C alatti ECS esetén gazdaságilag semmilyen CO_2-kibocsátás-szabályozás nem indokolt (Dayaratna et al. 2017, 2020). Pontos becslést lehetetlen készíteni, ezért a politikai döntéshozatalnak a bizonytalanságot figyelembe kell vennie.

Önmagában a légköri CO_2 megduplázódásának egyensúlyi felmelegedési hatása valamivel több, mint 1 °C (Soden és Held 2006). Az ECS nagyobb értékei már pozitív visszacsatolásokból erednek,

amelyek a CO_2 felmelegedését felerősítik. A vízgőz-visszacsatolás pozitív: melegebb légkörben több vízgőz lehet, ami önmagában is erős üvegházhatású gáz. A melegebb hőmérséklet kevesebb hó- és tengeri jégtakarót is eredményez, ami lehetővé teszi a Föld számára, hogy többet nyeljen el a napsugárzásból. Ezen visszacsatolások néhány egyszerű becslése az ECS-t körülbelül 2°C-ra növeli (Sherwood et al., 2020). Az ECS magasabb értékei pozitív felhő-visszacsatolásokkal kapcsolatosak.

Klímakutatók az egyensúlyi klímaérzékenység meghatározásához többféle bizonyítékot használnak:

- Klímamodell-szimulációk,
- Történelmi megfigyelések,
- Paleoklíma-rekonstrukciók,
- A visszacsatolások folyamatalapú megértése.

4.2 A klímaérzékenység modellalapú becslése

Az IPCC AR4-ben és AR5-ben megadott ECS-tartományokat elsősorban nagyléptékű klímamodellek, más néven általános cirkulációs modellek (GCM-ek) viselkedésének vizsgálatával kapták meg. Az IPCC azonban az AR6-ban irányt váltott, amikor egy közvetlenebb, adatalapú módszertan felé fordult. Itt a GCM-ből kiinduló klímaérzékenység-meghatározás használatának néhány buktatóját tárgyaljuk.

Az ECS klímamodell-szimulációkból a CO_2-koncentráció megduplázásával határozható meg úgy, hogy a felmelegedés egyensúlyba kerüléséhez több évszázadnyi várakozást is figyelembe vesznek. Az ilyen hosszú szimulációk szükségességének elkerülése érdekében a „tényleges klímaérzékenységet” általában a CO_2 hirtelen megnégyszereződését követő 150 éves szimulációból adják meg.

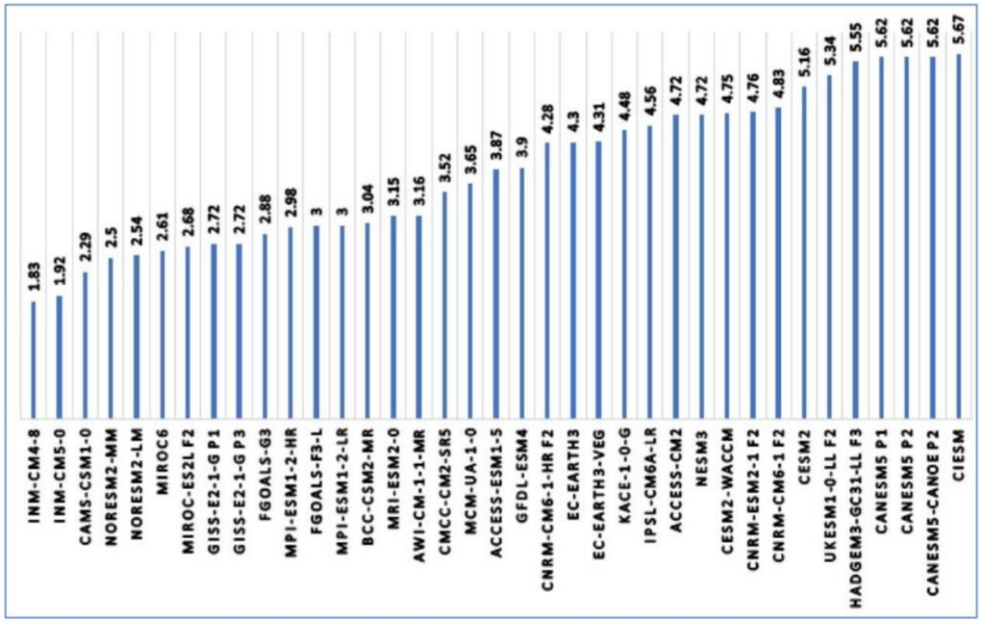
Az ECS elvileg a globális felmelegedési modellek (GCM) a rendszer egészéből levezethető (ún. emergens) tulajdonsága – vagyis nem közvetlenül paraméterezett vagy hangolt, hanem a szimuláció eredményeiben jelenik meg. Az egyébként hihető GCM-eket és paraméterválasztásokat azonban a várható felmelegedési ütemmel való észlelt konfliktus, illetve az elfogadott tartományon kívül eső modell klímaérzékenységével szembeni idegenkedés miatt elvetették (Mauritsen et al. 2012). Ez volt a bevett gyakorlat az AR4-ben használt modellek esetében; a modellezők azonban idővel eltávolodtak ettől. Mauritsen és Roeckner (2020) azonban még egy CMIP6 modellben is a következőket állítják a Max Planck Intézet (MPI) klímamodelljével kapcsolatban (a kiemelés tőlünk való):

> „Dokumentáltuk, miként hangoltuk az MPI-ESM1.2 globális klímamodellt, hogy az megfeleljen a felmelegedés műszeres adatainak; ez a törekvés egyértelműen sikeres volt. Az események történelmi sorrendje miatt a választás az volt, hogy ezt gyakorlatilag úgy tegyük meg, hogy nem aeroszolkényszer hangolásával, hanem **felhő-visszacsatolások** segítségével körülbelül 3 K-es **ECS-t célozzunk meg**.”

Azaz az MPI modellezők kiválasztották a 3°C-os ECS-értéket, majd a felhőparaméterezéseket a kívánt eredményhez hangolták.

Amint megjegyeztük, a CO_2-megduplázódásból eredő közvetlen felmelegedés csak körülbelül 1°C (Soden és Held 2006); a további felmelegedés olyan éghajlati visszacsatolásokból ered, amelyeket a GCM nem explicit módon, hanem fizikai folyamatok paraméterezésén alapulva old meg. Az ECS magasabb értékei elsősorban pozitív felhő-visszacsatolásokból erednek, miközben a visszacsatolások nagysága és előjele is nagyon bizonytalan. A felhő-visszacsatolás elemei közé tartozik a felhők földrajzi szélességi eloszlásban megmutatkozó változások, a felhőmagasság-eloszlás változásai

(alacsony és magas felhők változásai), a felhők halmazállapotának változásai (jég vs. folyadék), a felhőrészecske-méret változásai (az aeroszolrészecskék koncentrációjának és/vagy összetételének változásaival összefüggésben), a felhők csapadékhatékonyságának változásai, sőt még a felhők 24 órás napsütési ciklus szerinti eloszlásának változásai is (Curry és Webster, 1999). A GCM-ek kis léptékük miatt nehezen tudják ezeket a folyamatokat helyesen szimulálni, nemhogy megjósolni, hogyan fognak változni a jövőben. Továbbá a felhőfolyamatok modulálják a vízgőz-koncentrációt, a hőmérséklet-ingadozás mértékét és a felszín albedó-visszacsatolásait.



4.1. ábra: A CMIP6 modellegyüttes 37 klímamodelljének egyensúlyi klímaérzékenysége °C-ban. A különféle modellek azonosítói a vízszintes tengely mentén vannak feltüntetve. Forrás: (Scafetta, 2021)

Az AR5-ben használt CMIP5 klímamodell-együttes ECS-értékei a 2,0–4,7°C közötti intervallumba esnek; e tartomány az AR6-ban használt CMIP6 modellek esetében 1,8 és 5,7°C közé nőtt (Chen et al., 2021, Scaffeta 2021, lásd 4.1. ábra). Ahelyett, hogy tisztázódna a modellalapú klímaérzékenység, a lehetséges tartomány növekedni látszik. A CMIP6-ban az ECS CMIP5-höz képest összességében felfelé történő eltolódásának fő oka a pozitív felhő-visszacsatolás erősödése, amit számos CMIP6 modellben a felhőparaméterezés változásai okoznak (Zelinka et al., 2020).

A modell finomhangolásával és a felhőparaméterezésekre való magas érzékenységgel kapcsolatos aggodalmak miatt az AR6 (2021) az éghajlati érzékenység értékelésében nem az éghajlati modell szimulációira támaszkodott, hanem adatalapú módszerekre.

4.3 A klímaérzékenység adatalapú becslése

Az éghajlati érzékenység a felszíni hőmérséklet és az óceáni hőtartalom műszeres adataiból is becsülhető, kombinálva az éghajlati kényszerek (pl. üvegházhatású gázok, napenergia, vulkánkitörések, aeroszolok) múltbeli változásainak becslésével (Otto et al., 2013). Ezen információk felhasználásával egyszerű empirikus energiamérleg-modellt lehet alkalmazni. Ez egy olyan visszacsatolási paraméter becslését igényli, amelynek bizonytalanságai a kapott ECS-ben nagymértékben felerősödnek (Roe és Baker, 2007).

Az adatalapú módszerek pontossága a bemeneti adatok minőségétől függ. Feltételezésekre van szükség az óceánok hőtárolásával kapcsolatban, és jó adatok csak az elmúlt évtizedekre állnak rendelkezésre. A legnagyobb bizonytalanság forrása az aeroszolrészecskék mennyisége és összetétele, valamint azok kölcsönhatása a felhők sugárzási tulajdonságaival (az úgynevezett aeroszol közvetett hatása; lásd a 3.1.1., 3.1.2. ábrákat). Az éghajlati modellek az üvegházhatású gázokra válaszul felmelegedést, az aeroszolokra pedig lehűlést mutatnak (Schwartz et al., 2007). A megfigyelt 20. századi felmelegedés vagy az alacsony ECS-sel és a kismértékű aeroszol lehűléssel, vagy a magas ECS-sel és a magas aeroszol lehűléssel van kimutathatóan összhangban. Mivel a fosszilis tüzelőanyagok használata mind üvegházhatású gázokat, mind aeroszolokat juttat a légkörbe, a CO_2 felmelegítő hatásának elkülönítéséhez mindkét hatást meg kell becsülni.

A paleoklíma- proxikat a Föld hőmérsékletében bekövetkezett paleoéghajlati változások és a kényszerítő tényezők változásaira vonatkozó becslések összehasonlításával a múltbeli éghajlati érzékenység megismerésére is alkalmazzák. A két leginformatívabb időszak az utolsó jégkorszaki maximum (körülbelül 20 000 évvel ezelőtt), ami alatt körülbelül 3–7 °C-kal hidegebb volt, mint ma, és egy középső pliocén időszak (körülbelül hárommillió évvel ezelőtt), aminek folyamán 1–3 °C-kal melegebb volt, mint ma. A legjobb bizonyítékot arra, hogy az éghajlati érzékenység magas értékei valószínűtlenek, az utolsó jégkorszaki maximum idején tapasztalt lehűlés-korlátok adják. A paleoklíma-becslés azonban a becsült hőmérsékletekben és kényszerítő tényezőkben egyaránt nagyon nagy bizonytalanságokkal jár. Továbbá a múltbeli éghajlati állapotokon alapuló éghajlati érzékenység becslése nem feltétlenül alkalmazható az éghajlati rendszer jelenlegi állapotára.

Az éghajlati szakirodalomban vissza-visszatérő téma, hogy a történelmi adatokon alapuló ECS-becslés kisebb értéket ad, mint az éghajlati modellekből következtetett ECS-becslés (Sherwood és Forest 2024). A 2012 és 2024 közötti lektorált szakirodalomban körülbelül 15, historikus adatokon alapuló becslés jelent meg, amelyek az ECS legjobb becslését 1,0 °C és 2,5 °C között adták, bár a kritikusok megkérdőjeleztek néhány módszert, valamint az adatok minőségét is. Az AR6 esetében az IPCC elsődlegesen Sherwood et al. (2020) eredményein alapul, amelyek a historikus adatokat és a paleoklimatikus közelítő értékeket folyamatalapú megközelítéssel kombinálták, és legjobb becslésre 3,1 °C-ot kaptak, 2,6-3,9 °C közötti valószínű tartománnyal. Lewis (2022) számos aggályt fogalmazott meg ezzel az eredménnyel kapcsolatban, beleértve a módszertani hibákat, az elavult bemeneti értékeket és a szubjektív Bayes-előfeltevések használatát az elemzésben. Lewis elemzése megállapította, hogy az éghajlati érzékenységre sokkal alacsonyabb becsült értékek és sokkal szűkebb korlátok adódnak, mint amik kijöttek a Sherwood et al. által végzett elemzésből. A medián 2,2°C (1,8–2,7°C a 17–83 százalékos valószínűségi tartományban, és 1,6–3,2°C az 5–95 százalékos, nagyon valószínű tartományban). Az IPCC AR6 mindössze 5 százalékos valószínűséget becsült arra, hogy az ECS 2,3°C alatt lesz, míg ugyanezt Lewis 50 százalék felettire becsülte. A Sherwood et al., valamint Lewis közötti vitáról szóló legfrissebb publikációk tovább védik álláspontjukat: Sherwood és Foster (2024), valamint Lewis (2025).

Az AR6-ban hangsúlyozott érv szerint az adatalapú ECS-becslések az úgynevezett „mintázathatás" miatt alábecsülhetik az üvegházhatású gázokra adott jövőbeli felmelegedési reakciót (Forster et al., 2021). Úgy vélik, hogy a Csendes-óceán trópusi részén erősen befolyásolja a Föld űrbe történő hősugárzásának általános hatékonyságát, de egyes régiók hatékonyabban távolítják el a hőt, mint mások. Ha a trópusi Csendes-óceán nyugatról keletre irányuló hőmérsékleti gradiense egy melegedő éghajlatban gyengül, a felmelegedés ott koncentrálódik, ahol a hő kevésbé hatékonyan távolítható el, növelve az ECS-t.

A legtöbb klímamodell azt szimulálja, hogy az emelkedő koncentrációjú üvegházgázok gyengítik a nyugat-keleti hőmérsékleti gradienst, ami arra késztette az IPCC-t az AR6-ban, hogy arra a következtetésre jusson, hogy az adatalapú ECS-becslések a jövőbeni ECS-értéket alábecsülték. Seager et al. (2019) azonban rámutatott arra, hogy - a modellekkel ellentétben - a nyugat-keleti hőmérsékleti gradiens az idő múlásával erősödött. Azzal is érveltek, hogy a klímamodellekben ennek az ellenkezőjét előre jelző mechanizmus az óceáni dinamika hibás jellemzésén alapult, és nincs ok arra, hogy a gradiens gyengüljön. Hasonló érvet fogalmazott meg nemrégiben Lee et al. (2024). E tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy „a megfigyelt trend íve az erősödő légköri ÜHG-

terhelésre adott választ tükrözi"; más szóval, az ÜHG-felmelegedésnek a hőmérsékleti gradiens jövőbeni erősödéséhez, nem pedig gyengüléséhez kellene vezetnie. A légköri hűtés egyre erősebb hatékonysága azzal jár, hogy a jövőbeni ECS egy melegedő éghajlaton *alacsonyabb* lehet a jelenlegi becsléseknél.

4.4 Tranziens klímaérzékenység

Az átmeneti klímaválasz (TCR) az éghajlati érzékenységre vonatkozóan hasznosabb megfigyelési korlátot biztosít. A TCR az a globális hőmérséklet-emelkedés, amely akkor következik be, amikor a CO_2-szint 70 éven keresztül évi 1 százalékkal növekszik (azaz fokozatosan duplázódik meg). Az ECS-hez képest a megfigyeléssel meghatározott TCR-értékek elkerülik az óceáni hőfelvétel bizonytalanságainak problémáit és a hosszabb távú visszacsatolási folyamatok (pl. jégtakarók) időléptékeiből adódó egyensúlyi állapotok meghatározásának homályos határát. A TCR-t jobban korlátozza a történelmi felmelegedés, mint az ECS-t. Az AR6 a TCR nagyon valószínű tartományát 1,2–2,4 °C-nak becsülte. Az ECS-sel ellentétben a TCR felső határa szigorúbban korlátozott. Összehasonlításképpen, a Lewis (2023) által meghatározott TCR-értékek 1,25–2,0 °C között vannak, ami sokkal jobb egyezést mutat az AR6 értékekkel, mint amit az ECS-értékek összehasonlításakor láthattunk.

Hivatkozások

Carbon Brief. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity

Carbon Brief. (2020, July 22). Guest post: Why low-end 'climate sensitivity' can now be ruled out. https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-low-end-climate-sensitivity-can-now-be-ruled-out

Carbon Brief. (2021, August 9). In-depth Q&A: The IPCC's sixth assessment report on climate science. https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-the-ipccs-sixth-assessment-report-on-climate-science

Chen, D., et al. (2021). Framing, context, and methods. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), 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.

Curry, J. A., & Webster, P. J. (1999). Thermodynamic feedbacks in the climate system. In Thermodynamics of atmospheres and oceans (pp. 351–385). Academic Press.

Dayaratna, Kevin, Ross McKitrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. Climate Change Economics April 2017 DOI: http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063

Dayaratna, Kevin, Ross McKitrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. Environmental Economics and Policy Studies https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w

Forster, P., et al. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), 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.

Hausfather, Z. (2020, July 22). Explainer: How scientists estimate climate sensitivity. Carbon Brief. https://www.carbonbrief.org/explainer-how-scientists-estimate-climate-sensitivity

Lan, X., Tans, P., & Thoning, K. W. (2025). Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. NOAA Global Monitoring Laboratory. https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07

Lee, S., Byrne, M. P., Loikith, P. C., & O'Dell, C. W. (2024). Zonal contrasts of the tropical Pacific climate predicted by a global constraint. Climate Dynamics, 62(1–2), 229–246. https://doi.org/10.1007/s00382-023-06741-7

Lewis, N. (2023). Objectively combining climate sensitivity evidence. Climate Dynamics, 61(9–10), 3155–3163. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8

Lewis, N. (2025). Comment on "Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further?" by Sherwood and Forest (2024). EGUsphere [preprint]. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1179

Thorsten Mauritsen et al., (2012) "Tuning the Climate of a Global Model," Journal of Advances in Modeling Earth Systems 4, no. 3 https://doi.org/10.1029/2012ms000154

Mauritsen, T., & Roeckner, E. (2020). Tuning the MPI-ESM1.2 global climate model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12, e2019MS002037. https://doi.org/10.1029/2019MS002037

Otto, A., Otto, F. E. L., Boucher, O., Church, J., Hegerl, G., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Johnson, G. C. (2013). Energy budget constraints on climate response. Nature Geoscience, 6(6), 415–416. https://doi.org/10.1038/ngeo1836

Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2015). Climate change 2014: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Roe, G. and M. Baker (2007). Why is climate sensitivity so unpredictable? Science 318, 629-632. https://doi.org/10.1126/science.1144735

Scafetta, N. (2021). Testing the CMIP6 GCM simulations versus surface temperature records from 1980–1990 to 2011–2021: High ECS is not supported. Climate, 9(11), 161. https://doi.org/10.3390/cli9110161

Schwartz, S. E., R. J. Charlson, H. Rodhe (2007). Quantifying climate change—Too rosy a picture? Nature Climate Change 1, 23–24, https://doi.org/10.1038/climate.2007.22

Seager, R., Cane, M., Ting, M., Naik, N., Clement, A., DiNezio, P., & Lee, D. E. (2019). Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases. Nature Climate Change, 9(7), 517–522. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0505-x

Sherwood, S. C., & Forest, C. E. (2024). Opinion: Can uncertainty in climate sensitivity be narrowed further? Atmospheric Chemistry and Physics, 24(5), 2679–2686. https://doi.org/10.5194/acp-24-2679-2024

Sherwood, S. C., Bony, S., Boucher, O., Bretherton, C. S., Forster, P. M., Gregory, J. M., & Stevens, B. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. Reviews of Geophysics, 58(4). https://doi.org/10.1029/2019rg000678

Soden, B. J., and I.M. Held (2006). An assessment of climate feedbacks in coupled ocean–atmosphere models. Journal of Climate, 19(14), 3354–3360. https://doi.org/10.1175/jcli3799.1

Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. Geophysical Research Letters, 47, e2019GL085782. https://doi.org/10.1029/2019GL085782

5 ELTÉRÉS A MODELLEK ÉS A MŰSZERES MEGFIGYELÉSEK KÖZÖTT

Fejezet-összefoglaló

A klímamodellek elmúlt évtizedekre visszamenő alkalmazása számos vonatkozásban felmelegedési torzítást mutat. A kényszertényezők becsült változásaira túl nagy földfelszíni felmelegedés adódik (a legalacsonyabb ECS klímaértékű modellek kivételével), a modellben túl nagy a felmelegedés az alsó és a középső troposzférában, valamint felfelé túl nagy az erősítés.

A klímamodellek az amerikai kukoricaövben túl nagy közelmúltbeli sztratoszférikus lehűlést, érvénytelen félgömbi albedó értékeket, túl nagy hóveszteséget és túl nagy felmelegedést is mutatnak. Az IPCC elismerte ezen problémák némelyikét, de nem mindegyiket.

5.1 Bevezetés

Az antropogén üvegházgázok légköri szintjének emelkedésére bekövetkező jövőbeli klímaváltozások előrejelzésének elsődleges eszközei a klímamodellek. Annak felméréséhez, hogy a klímamodellek alkalmasak-e erre a célra, ésszerű feltenni azt a kérdést, hogy a modellek mennyire jól adják vissza a jelenlegi éghajlatot és annak változásait az elmúlt évszázad folyamán. Az „Éghajlatmodellezés” című keretes rész részletesen ismerteti a klímamodellek működését.

Kiemelt aggodalomra ad okot az a tény, hogy miután több évtizeden át, körülbelül három tucat modellel dolgoztak a világ kutatóközpontjai, a légköri CO_2 hipotetikus megduplázódására adott válaszként bekövetkező jövőbeli felmelegedés modellezett mértékeiben egymáshoz képest több mint háromszoros szorzótényezők is vannak, amint azt az előző fejezetben tárgyaltuk. A modellek közötti eltérések e tartománya évtizedek óta nem csökkent.

A klímamodellek nemcsak a jövővel kapcsolatos nézeteltéréseik miatt problémásak, hanem abban a tekintetben is, hogy képesek-e a közelmúltbeli eseményeket jól visszaadni. E fejezetben áttekintjük a klímamodellek pontosságának néhány legfontosabb mérőszámát: a történelmi felszíni, a troposzférabeli és a sztratoszférabeli hőmérsékleti trendek reprodukálási képességét; a vertikális felmelegedési profil reprodukálási képességét; és más éghajlati jellemzők, például a havazás reprodukálásnak képességét. Mindegyik esetre érvényes az a megállapítás, hogy a becsült múltbeli kényszertényezőkre adott válaszként a modellátlagok a túl nagy felmelegedés felé tévednek el.

TUDÁSDOBOZ: Klímamodellezés

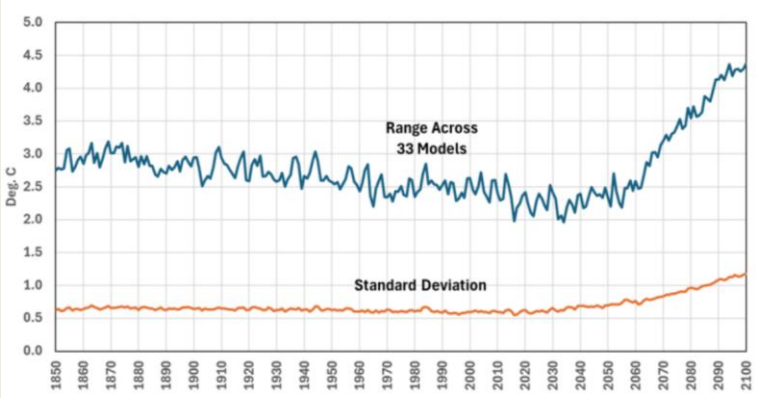
Az összes klímamodell (a legegyszerűbb kivételével) a Föld szárazföldi felszínét egy körülbelül 100 km-es négyzetrács segítségével ábrázolja. A légkör szimulálásához e négyzetek felett jellemzően 30, esetleg annál több rácsdobozt helyeznek el. Az óceánt hasonló, de finomabb ráccsal modellezik. A légkört és az óceánokat több tízmillió rácsdobozra osztják fel.

A fizikai törvényeken alapuló számítógépes modellek kiszámítják, hogyan mozog a levegő, a víz és az energia a rácsdobozok között az idő múlásával. Az időlépés akár 10 perc is lehet, és ennek a folyamatnak több milliónyi ismétlése lehetővé teszi az éghajlat évszázadokon át tartó szimulációját. Ezeknek a modelleknek a lefuttatása még a legerősebb szuperszámítógépeken is hónapokig eltarthat. A szimulációs eredmények összehasonlítása a történelmi éghajlati adatokkal segít felmérni a modell pontosságát, míg a jövőbe mutató előrejelzéssel becslést adnak a feltételezett emberi és természeti hatásokra bekövetkező éghajlatváltozásra.

Annak ellenére, hogy egyszerűnek hangzik, az éghajlatmodellezés rendkívül összetett. Számos kritikus folyamat a rácsméretnél kisebb léptékben zajlik. Például a napfény és a hő áramlása a légkörben erősen függ a felhőzettől. Mivel az egyes felhők nyomon követése nem járható út, a kutatóknak „alrácsos” feltételezéseket kell tenniük a felhők eloszlásáról az egyes rácsdobozokban. A hó- és jégtakaró, ami azt befolyásolja, hogy mennyi napfény verődik vissza vagy nyelődik el a felszínen, egy másik alrácsos feltételezést jelent.

Minden egyes alrácsos feltételezéshez numerikus paraméterekre van szükség, amelyeket gondosan be kell állítani. A modellezők kezdetben a fizika és a megfigyelt éghajlati minták alapján becsülik meg ezeket a paramétereket, majd lefuttatják a modellt. Mivel a kezdeti eredmények gyakran jelentősen eltérnek a valós megfigyelésektől, ezeket a paramétereket „hangolják”, hogy a megfigyelt éghajlati jellemzőkhöz jobban illeszkedjenek. A különböző modellezőcsoportok eltérő feltételezéseket és hangolási stratégiákat alkalmaznak, és ez vezet eltérő eredményekre. A hangolás a klímamodellezés szükséges, de kényes oldala, mint minden összetett rendszer esetében. A rossz hangolás pontatlan szimulációkhoz vezethet, míg a túlzott hangolás azzal a kockázattal jár, hogy az eredményeket mesterségesen tereli előre meghatározott következtetések felé.

A jelenlegi éghajlat modellreprezentációinak skálája nagyon széles. Az egyik legalapvetőbb mutató – a Föld átlagos felszíni hőmérséklete – körülbelül 3°C-kal változik a CMIP6 modellekben 1880 előtt (5.1. ábra), majd 2040-ig kissé szűkül, ezután több mint 4°C-ra divergál. Összehasonlításképpen: a 20. századi felmelegedés csak körülbelül 1,0°C volt. Ez az eltérés arra utal, hogy a modellek fizikai folyamatai között jelentős különbségek vannak.



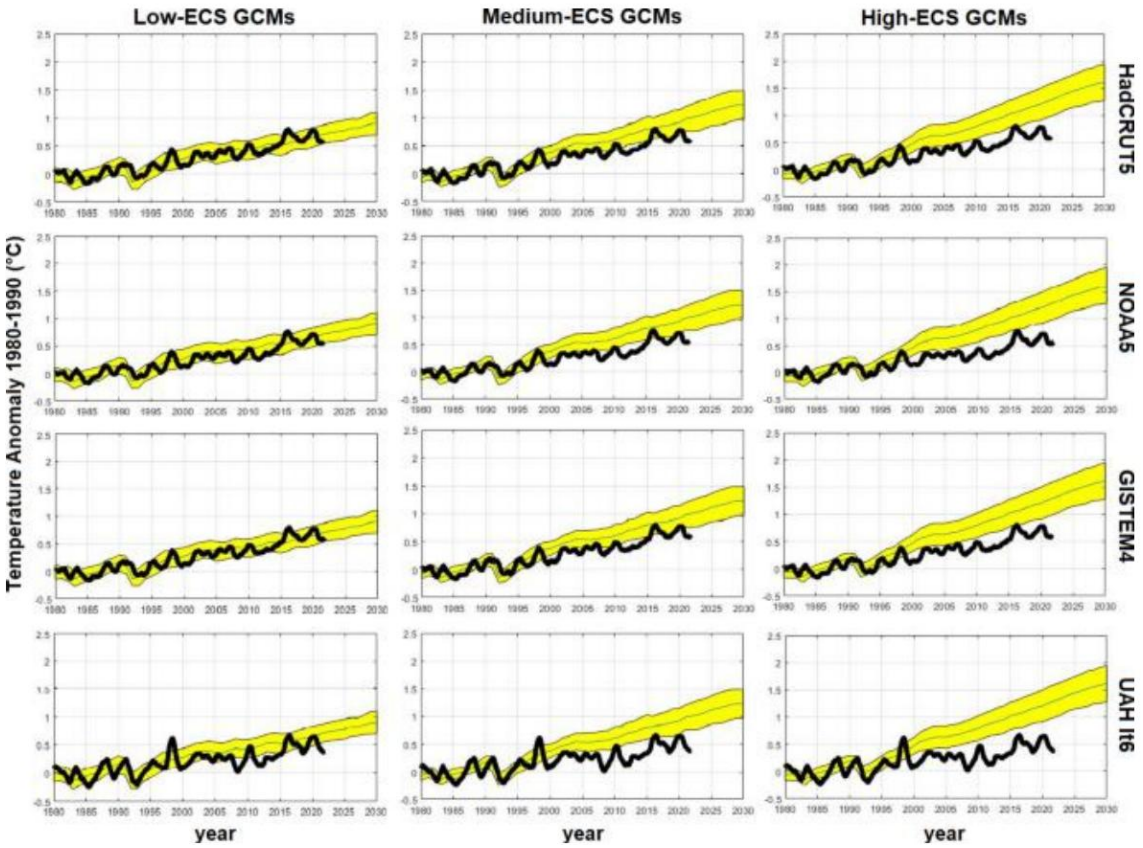
5.1. ábra: CMIP6 Átlagos felszíni hőmérséklet tartománya 33 modellben és szórás az SSP5-85 forgatókönyv alapján. Adatok a KNMI Climate Explorer weboldaláról: https://climexp.knmi.nl/start.cgi

A modellek azon képességén túl, hogy leírják a mai éghajlat jellemzőit, a társadalom számára kritikus kérdés az, hogy mennyire jól jelzik előre a nehezen megfogható emberi hatásokra (például az üvegházgáz-kibocsátásra, az aeroszol általi hűtésre és a földhasználat változásaira) adott válaszokat. A legfontosabb szempont, amelyet a modelleknek helyesen kell rögzíteniük, a „visszacsatolások”. Ezek akkor fordulnak elő, amikor az éghajlatváltozás vagy felerősíti, vagy elnyomja a további felmelegedést. Általánosságban elmondható, hogy az összes visszacsatolás modellezett nettó hatása a CO_2 közvetlen felmelegedési hatását megduplázza, sőt megháromszorozza.

5.2 Felszíni felmelegedés

Egy klímamodell érvényességének egyszerű tesztje az, hogy képes-e reprodukálni a történelmi felmelegedést az olyan ismert múltbeli éghajlati tényezők változásaira adott válaszként, mint az üvegházgázok. Az 5.2. ábra Scaffeta (2023) munkájából származik, amely a legújabb generációs (CMIP6) klímamodelleket alacsony ECS (1,5–3,0 °C), közepes ECS (3,0–4,5 °C) és magas ECS (4,5–6,0 °C) kategóriákba csoportosítja, és összehasonlítja az 1980 utáni globális átlaghőmérsékleti szimulációs tartományaikat három felszíni hőmérsékleti idősor és egy műholdas alsó troposzféra hőmérsékleti adatsor tartományaival.

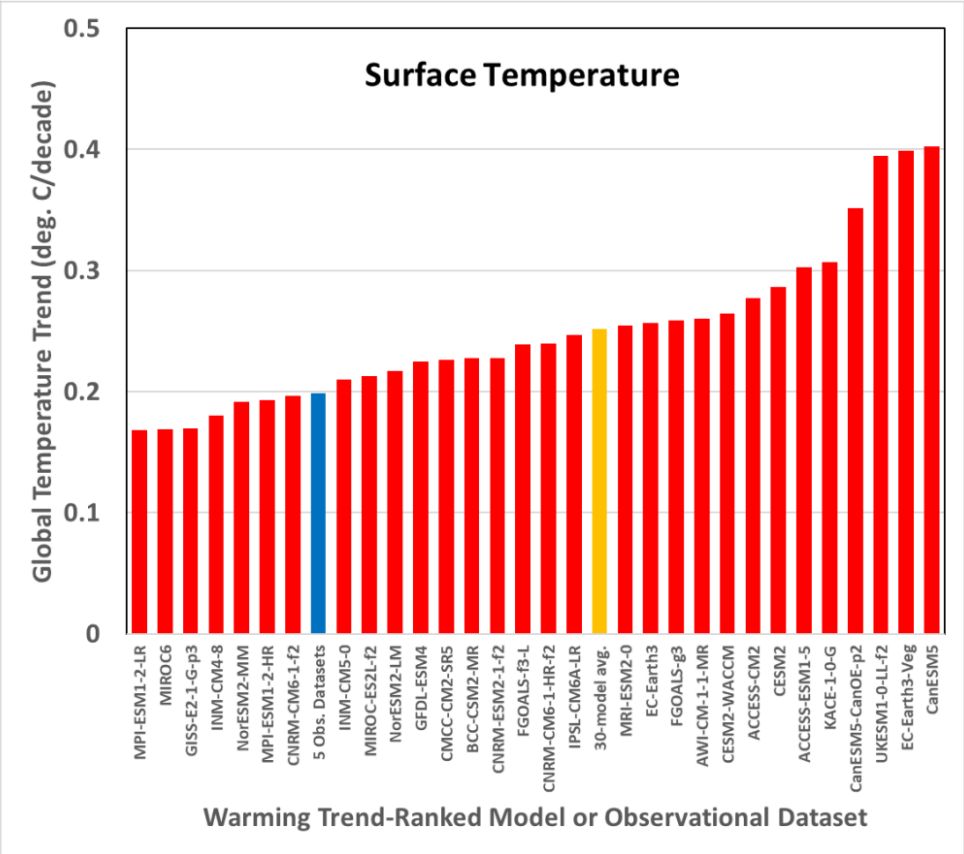
A bal szélső oszlop azt mutatja, hogy az alacsony ECS-modellek meglehetősen jól követik az 1980 utáni történelmi felmelegedési megfigyeléseket, a középső és a jobb oldali oszlop viszont azt mutatja, hogy a közepes és magas ECS-modellek a felmelegedést feltűnően túlbecsülik.



5.2. ábra: Modelleredmények összehasonlítása a Föld felszíni felmelegedésére vonatkozó megfigyelésekkel. Az oszlopok alacsony ECS-t (13 modell), közepes ECS-t (11 modell) és magas ECS-t (14 modell) mutató modellcsoportoknak felelnek meg, míg a sorok széles körben használt megfigyelt hőmérsékleti idősorokat mutatnak. Az első három felszíni átlagokat, a negyedik pedig az alsó troposzféra átlagát mutatja. Minden panelen a sárga szín jelöli az adott csoportra vonatkozó klímamodell-szimulációk átlagát és tartományát (± egy szórás). A vastag fekete vonal a jelzett rekordban megfigyelt éves átlaghőmérsékletet ábrázolja. Forrás: Scafetta (2023) 2. ábra.

Spencer (2024) ugyancsak hasznos összefoglalást adott a modellek és a megfigyelések közötti eltérésekről: összehasonlította a felszínihőmérsékleti adatsor trendjét az egyes klímamodellekben

szereplő trenddel, amint azt az 5.3. ábra foglalja össze; a legtöbb klímamodell az 1979 óta végzett megfigyeléseknél lényegesen nagyobb felmelegedést mutat.



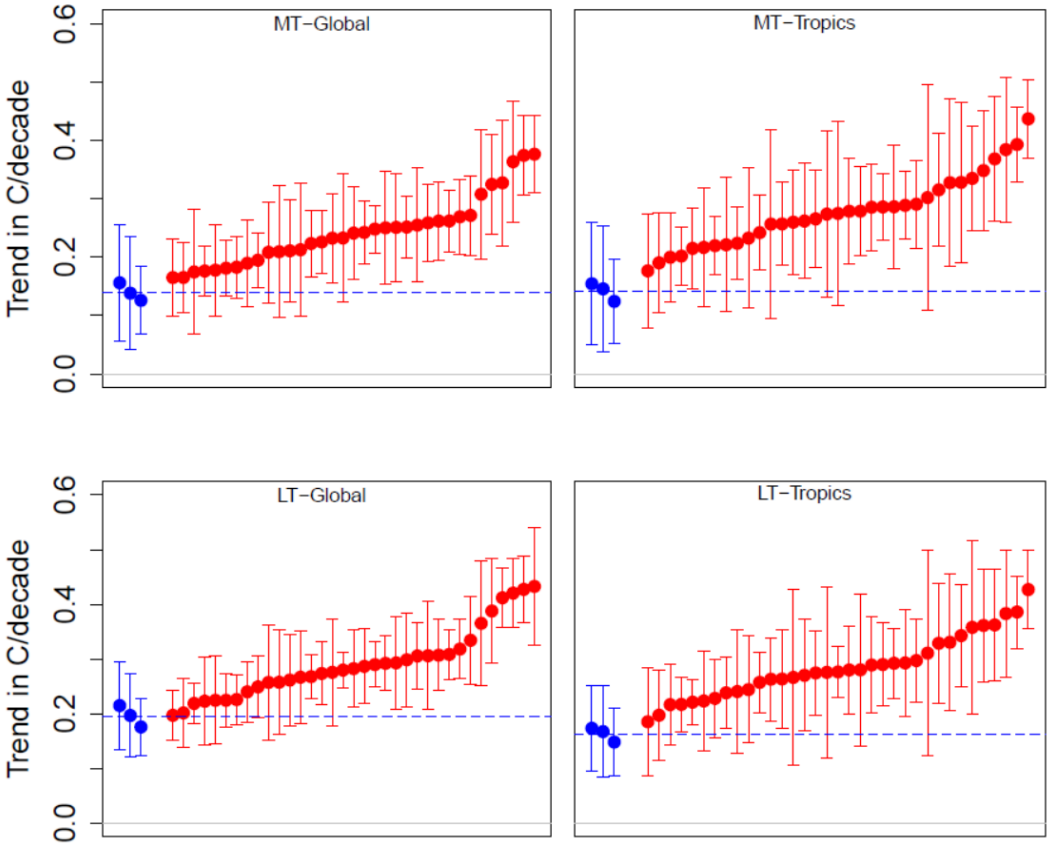
5.3. ábra: Globális felszíni levegőhőmérsékleti trendek (°C/évtized), 1979-2024, különböző CMIP6 klímamodellekből (piros; 30 modell átlaga: narancssárga); valamint kékkel jelölt három hőmérsékleti adatsor (HadCRUT5, NOAA Global Temp és Berkeley 1 deg.) és két újrafeldolgozási adatsor (ERA5 és NCEP/NCAR R1) átlaga. Adatforrás: https://climexp.knmi.nl/start.cgi.

5.3 Troposzféraikus melegedés

Régóta ismert, hogy az éghajlati modellek átlaga túlbecsüli a trópusi troposzférában bekövetkező felmelegedést. E régió fontos tesztje az éghajlati modelleknek, mivel itt jelenik meg először és a legerősebben az antropogén üvegházhatású felmelegedés jele. A troposzféra-trendekben mutatkozó torzítások a hőátadási folyamatokban meglévő olyan modellhibákat jeleznek, amelyek a felszíni felmelegedési torzításokra is átragadnak.

Az eltérést az első amerikai klímaváltozási tudományos programjelentésben (Karl et al. 2006) súlyos következetlenségként jelölték meg, és azóta minden IPCC-jelentésben megemlítették, de az eltérés az idő múlásával egyre súlyosbodott, és az eltérés ma már globális. McKitrick és Christy (2020) összehasonlították a CMIP6 klímamodellekben megfigyelt troposzféra-felmelegedési trendeket a műholdakról, meteorológiai léggömbökből és újrafeldolgozási rendszerekből megfigyelt trendekkel. Az 1979-2014 közötti átlagos megfigyelt felmelegedési trendet mindegyik modell túlbecsülte mind az alsó, mind a középső troposzféra rétegeiben, mind globálisan, mind a trópusokon. A legtöbb egyedi modellben az eltérés statisztikailag szignifikáns volt, és a modellek átlagában is nagyon szignifikáns.

Az 5.4. ábra a 2024-ig frissített adatokkal való összehasonlítást mutatja be (McKitrick és Christy 2025). Az utóbbi meleg évek kissé felfelé mozdították a megfigyelt trendet, és kiszélesítették a trend konfidencia intervallumait, de az általános minta ugyanaz marad: a modell túl nagy felmelegedés felé tér el, a legtöbb esetben a különbség statisztikailag szignifikáns, és az átlagos eltérés statisztikailag nagyon szignifikáns. McKitrick és Christy (2020) azt is kimutatták, hogy az eltérés nagyobb a magas ECS-értékű modellekben, de még az alacsonyabb átlagos ECS-értékű modellek is túl nagy felmelegedést jósolnak. Ha a jövőbeli klímamodellek realisztikusan ábrázolnák a globális troposzféra- felmelegedést, valószínűleg kevésbé lennének érzékenyek, mint a CMIP6 modellegyüttes alacsony ECS-értékű tagjai.



5.4. ábra: A megfigyelt és a CMIP6 modellezett felmelegedési trendek (°C/évtized, 1979-2024) a globális és trópusi alsó (LT) és középső troposzférában (MT), McKitrick és Christy (2020) módszertanát alkalmazva, 2014 és 2024 közötti adatokkal frissítve. Kék pontok: felmelegedési trendek 95 százalékos konfidenciaintervallummal 3 adattermék (rádiószondák, újraelemzés és műholdak) esetében. Kék szaggatott vonal: a felmelegedési trend átlaga 3 megfigyelt sorozat esetében. Piros pontok: modellezett felmelegedési trendek 95 százalékos konfidencia-intervallummal 35 modellben, a legalacsonyabbtól a legmagasabbig rendezve.

Amint azt korábban említettük, az IPCC régóta elismeri a modellek és a megfigyelések közötti eltérést. Például az AR6 443-444. oldala a trópusi troposzféráról ezt állítja (a globális összehasonlítással nem foglalkozik):

> Az AR5 óta számos tanulmány továbbra is ellentmondást mutatott ki a szimulált és a megfigyelt hőmérsékleti trendek között a trópusi troposzférában, a modellek nagyobb mértékű felmelegedést szimuláltak, mint megfigyelések (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; McKitrick és Christy, 2018; Po-Chedley et al., 2021). … Az 1979–2014 közötti időszakban a modellek jobban összhangban vannak az alsó troposzférában végzett megfigyelésekkel, és a legkevésbé a felső troposzférában, 200 hPa

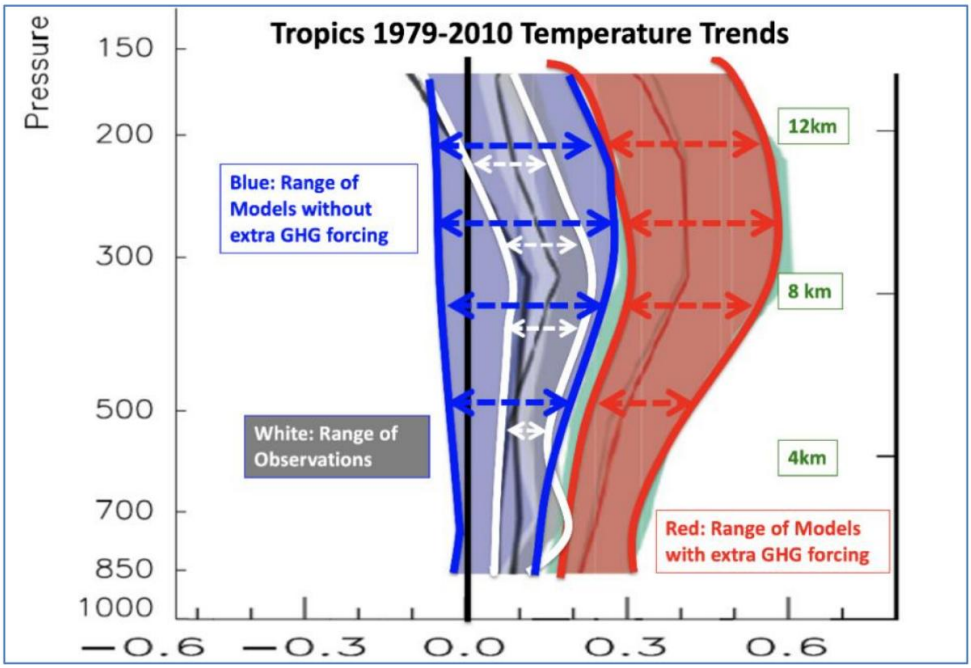
körül, ahol az eltérések meghaladják az évtizedenkénti 0,1°C-ot. Számos, CMIP6 modelleket használó tanulmány arra utal, hogy az éghajlati érzékenységbeli különbségek fontos tényezők lehetnek a szimulált és a megfigyelt troposzférikus hőmérsékleti trendek közötti eltérésben (McKitrick és Christy, 2020; Po-Chedley et al., 2021), bár nehéz dekonvolúciózni az éghajlati érzékenység, az aeroszolkényszer változásainak és a belső változékonyságnak a troposzférikus felmelegedési eltérésekhez való hozzájárulását (Po-Chedley et al., 2021). Egy másik tanulmány megállapította, hogy egy feltételezett negatív trópusi felhő-visszacsatolás hiánya az egyik modellben a felső troposzféra felmelegedési eltérésének felét magyarázhatja (Mauritsen és Stevens, 2015).

… Összefoglalva, a tanulmányok továbbra is úgy találják, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellszimulációk erősebben melegszenek, mint ahogy azt a trópusi közép- és felső troposzférában az 1979–2014 közötti időszakban végzett megfigyelések mutatják (Mitchell et al., 2013, 2020; Santer et al., 2017a, b; Suárez-Gutiérrez et al., 2017; McKitrick és Christy, 2018), és hogy részben a túlbecsült felszíni felmelegedés felelős (Mitchell et al., 2013; Po-Chedley et al., 2021). …. Ezért *közepes megbízhatósággal* értékeljük úgy, hogy a CMIP5 és CMIP6 modellek a felső trópusi troposzférában megfigyelt felmelegedést az 1979–2014 közötti időszakban továbbra is legalább 0,1°C-kal túlbecsülik.

Figyelemre méltó, hogy a túlzott modellfelmelegedésre utaló bizonyítékok felhalmozódása ellenére az IPCC a felmelegedési torzítás létezését csak *közepes megbízhatóságúnak* tekinti.

5.4 Eltérések a függőleges hőmérsékleti profil mentén

Egy másik fontos eltérés jelent a modellek és a megfigyelések között a klímamodellekben található magassággal való túlzott erősítés. Az összehasonlítás az AR5 10. fejezetében szerepelt, bár csak az online kiegészítésben (10.SM.1. ábra), és csak egy olyan ábrán, amelynek formázása elfedte a lényeget. A 10.SM.1. ábrára sem a fő IPCC-jelentésben, sem az összefoglalóban nem hivatkoznak, így az olvasók nem vehették észre. Bár első pillantásra nem nyilvánvaló, azt mutatja, hogy az alsó troposzférában az 1979-2010 közötti felmelegedés olyan kicsi, hogy összhangban van azzal, hogy nincs üvegházgáz-kényszer, és nem egyezik azokkal a modellfuttatásokkal, amelyek üvegházgáz-kényszert feltételeznek. Az 5.6. ábrán átdolgoztuk az IPCC AR5 10.SM.1. ábráját, hogy kiemeljük ezt a kritikus pontot.

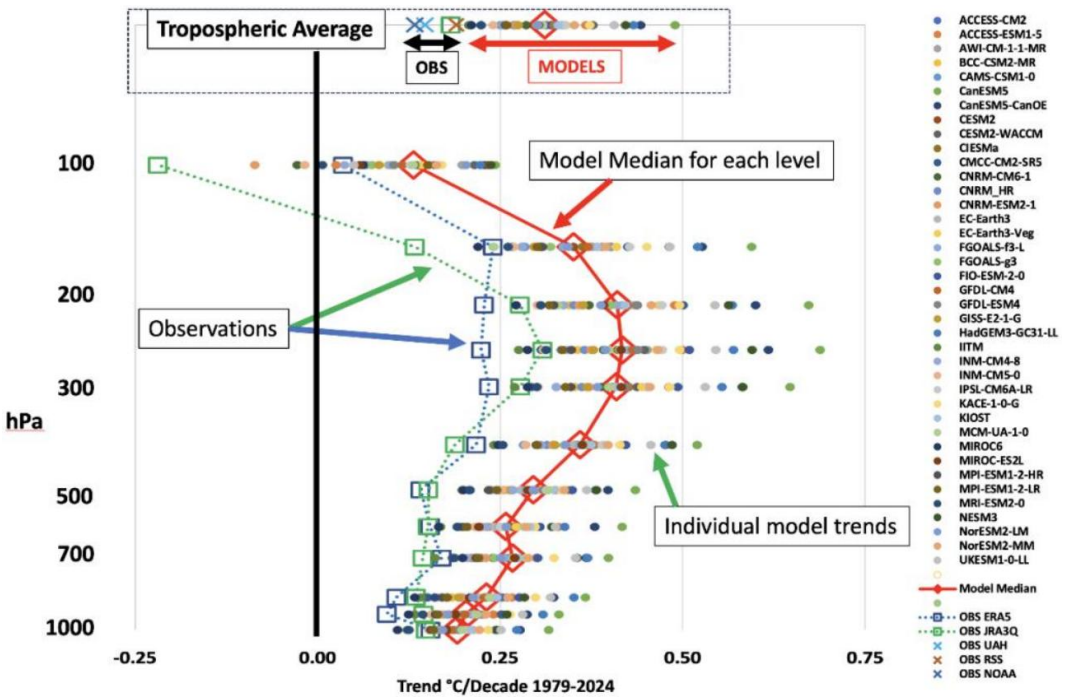


5.5. ábra: Függőleges melegedési mintázat a trópuson (a déli szélesség 20° és az északi szélesség 20° között). Vízszintes tengely: °C/évtized. Forrás: Az IPCC AR5 annotált verziójának 10.SM.1 ábrája

Az 5.5. ábra összehasonlítja a modell és a megfigyelés hőmérsékleti trendjeit a déli földrajzi szélesség 20° és az északi szélesség 20° között (a trópusi övezetben), a magasság függvényében. Ebben a régióban, ahol a modellek szerint a felmelegedésnek a legerősebbnek kellene lennie, a megfigyelések (itt fehér színnel jelölve) a kék „Nincs CO_2" sávon belül, és teljes mértékben a „CO_2-vel" piros burkológörbén kívül esnek. Ez azt jelenti, hogy a teljes trópusi légköri oszlopban, a felszíntől a sztratoszféra aljáig, a megfigyelt felmelegedési trendek olyan kicsik, hogy összhangban vannak az antropogén CO_2-t nem tartalmazó modellek kimenetével, és kívül esnek a megnövekedett CO_2-tartalommal kényszerített modellek által generált felmelegedési trendek teljes burkológörbéjén.

Hasonló összehasonlítást végzett Christy és McNider (2017), aminek frissített változatát (1979-2024) az 5.6. ábra mutatja be. A modellezett hőmérsékleti trendek meghaladják a felszíntől a troposzféra tetejéig tartó megfigyeléseket, a megfigyelt trendek a legtöbb nyomásszinten a teljes modelltartomány alatt vannak. Az 5.6. ábrán látható a három műholdas adatkészlet (NOAA, UAH és RSS) trópusi troposzférikus hőmérsékleti (TTT) átlaga is, összehasonlítva az 1979-2024 közötti éghajlati modellek ugyanazon rétegének átlagával. A megfigyelt trendek ismét teljesen a modelltartomány alatt helyezkednek el.

A modellezők által a modellekben zajló fizikai folyamatok jellemzésére hozott döntések széles skáláját (lásd a fenti 5.1. szakaszban a „TUDÁSBOX Klímamodellezés" című keretes írást) a középső troposzférában megfigyelhető trendek nagy szórása mutatja, ami a medián ±40 százaléka (5.6. ábra). Ez jól illusztrálja a bizonytalanságokat a turbulenciát, a nedvességgel kapcsolatos termodinamikát és az energiafluxusokat magában foglaló komplex rendszer modellezésére (paraméterezésére) tett kísérletekben a trópusi légkör idő- és térléptékeinek teljes tartományában.



5.6. ábra: Modellezett és megfigyelt melegedés trópusi troposzférában. Forrás: a 2024-es adatokkal is frissített Christy és McNider (2017). Zöld és kék vonalak: újrafeldolgozott megfigyelési idősorok.

Ez az eltérés sok vitát váltott ki, egyesek azzal érvelnek, hogy még ha a trópusokon nagyon kevés felmelegedést is figyelnek meg a magasban, akkor is létezik egy „forró pont" abban az értelemben, hogy a magasban a felmelegedés nagyobb, mint a felszínen (Santer et al. 2008). De erős bizonyítékok léteznek arra, hogy a modellek az erősítési rátát is eltúlozzák. Klotzbach et al. (2009) kimutatták, hogy a modellek nagyobb erősítést vetítenek előre a magasság függvényében, mint amennyit megfigyelnek. Ezt az eredményt később részletes idősoros elemzéssel (Vogelsang és Nawaz 2016) is megerősítették: kimutatták, hogy a modell és a megfigyelések közötti különbség statisztikailag szignifikáns.

A légkör hőmérsékleti profilja esetében a modellek nemcsak bizonytalanok, hanem a megfigyelésekhez képest közös felmelegedési torzítást is mutatnak. Ez bizonyos alapvető visszacsatolási folyamatok téves felfogására utal.

Az IPCC AR6 ezt a kérdést nem vizsgálta.

5.5 Sztratoszférikus hűlés

Az antropogén klímaváltozás várható általános „ujjlenyomatának" fontos eleme a troposzféra felmelegedésénekés a sztratoszféra lehűlésének egyidejű folyamata. Ez utóbbi jellemzőt az ózonréteg csökkenése és helyreállása is befolyásolja. Az AR6 elismerte, hogy lehűlést csak 2000-ig figyeltek meg. Azóta a sztratoszféra némi felmelegedést mutat, ellentétben a modell-előrejelzésekkel.

Az AR6 WG1 2. fejezet 327-9. oldala kimondja:

A teljes alsó sztratoszférában (körülbelül 10–25 km) az átlaghőmérséklet 1980 és 2019 között az összes adatot illetően csökkent, a csökkenés nagy része 2000 előtt történt. A csökkenés akkor is fennáll, ha eltávolítjuk az El Chichon (1982) és a Pinatubo (1991) vulkánkitörések trendre gyakorolt hatását, amelyről Steiner et al. (2020a) megállapították, hogy az 1979–2018 közötti lehűlési trendet évtizedenként 0,06°C-kal növelte. A 2000–2019 közötti időszakban a legtöbb

adathalmaz nem mutat jelentős trendet, még csak marginálisan jelentős trendet sem. Philipona et al. (2018) eredményei pedig gyenge növekedést mutatnak a 2000–2015 közötti időszakban a rádiószondákkal mintavételezett legalsó sztratoszférában….

Gyakorlatilag biztos, hogy az alsó sztratoszféra a 20. század közepe óta lehűlt. A legtöbb adathalmaz azonban azt mutatja, hogy az alsó sztratoszféra hőmérséklete az 1990-es évek közepe óta stabilizálódott, és az elmúlt 20 évben nem történt jelentős változás. Valószínű, hogy a középső és felső sztratoszféra hőmérséklete 1980 óta csökkent, de a nagyságrendet illetően alacsony a megbízhatóság.

A hivatkozott forrás, Philipona et al. (2018) a „Rádiószondák azt mutatják, hogy évtizedekig tartó lehűlés után az alsó sztratoszféra most melegszik" című cikkében kijelentette:

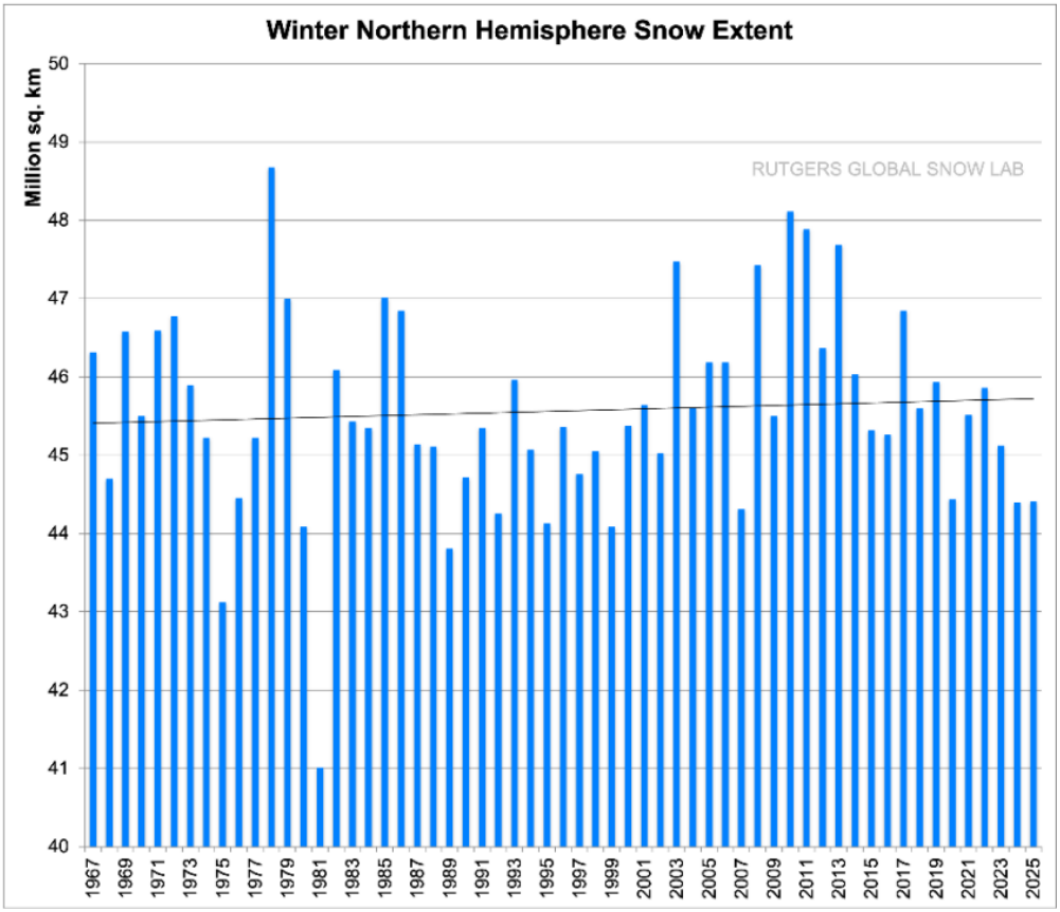
Az üvegházgázok folyamatos növekedésére és a sztratoszféra ózonrétegének elvékonyodására válaszul a klímamodellek az elkövetkező évtizedekben a troposzféra folyamatos felmelegedését és a sztratoszféra lehűlését vetítik előre. Az alsó sztratoszféra hőmérsékletének globális átlagos műholdas megfigyelése a századforduló óta nem mutat jelentős trendet. Ezzel szemben 60 állomás vertikálisan felbontott rádiószondás méréseinek elemzése az alsó sztratoszféra hőmérsékletének emelkedését mutatja a századforduló óta 15 és 30 km közötti magasságban és a legtöbb kontinensen. A trendbecslés némileg érzékeny a homogenitásértékelési döntésekre, de az alsó sztratoszférában az összes vizsgált rádiószondás adatkészlet a 20. század végi lehűlésről a 21. század eleji felmelegedésre való változást sugallja.

Santer et al. (2023) frissített adatokat is felhasznál annak kimutatására, hogy az alsó sztratoszférában a lehűlési trend nem jelent meg újra.

A troposzférikus felmelegedés és a sztratoszférikus lehűlés kombinációja az antropogén klímaváltozás gyakran emlegetett „ujjlenyomata". A sztratoszféra-felmelegedés 2000 óta egybeesik a folyamatos felszíni és troposzférikus felmelegedéssel, efféle mintázat a klímamodell-szimulációkban nincs, és nyilvánvalóan nem egyeztethető össze az antropogén ujjlenyomattal.

5.6 Eltérések a hótakaróban

A Rutgers Egyetem Hólaboratóriuma által összeállított adatok szerint az északi félteke téli hótakarója nem csökken (5.7. ábra); sőt, inkább emelkedő tendenciát mutat.



5.7. ábra: Az északi félteke téli hótakarójának kiterjedése. Forrás: https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 (hozzáférés: 2025. május 27.)

A modellek mégis az északi félteke hótakarójának csökkenését vetítik előre egy melegedő éghajlaton, ahogyan azt Connolly et al. (2019) is leírták.

> A klímamodellek rosszul magyarázták a megfigyelt trendeket [az északi félteke hótakarójában]. Míg a modellek azt sugallják, hogy a hótakarónak mind a négy évszakban folyamatosan kellett volna csökkennie, csak a tavasz és a nyár mutatott hosszú távú csökkenést, és a megfigyelt csökkenések mintázata ezekben az évszakokban meglehetősen eltért a modellezett előrejelzésektől. Ezenkívül az őszi és téli megfigyelési trendek hosszú távú növekedésre utalnak, bár e trendek statisztikailag nem szignifikánsak.

Az AR6 nagyrészt a tavaszi szezonra korlátozza az északi félteke hótakarójának kiterjedésével (SCE) kapcsolatos tárgyalását, amelyre vonatkozóan a modellek és a megfigyelések csökkenő tendenciát mutatnak. A téli változásokról a következő megjegyzést teszi (AR6 WGI 2. fejezet, 344. o.):

> Az északi féltekén (az NH-ban) 1978 óta tapasztalható SCE-trend értékelése azt mutatja, hogy az októbertől februárig tartó időszakban jelentős bizonytalanság van a trendben, ahol az előjel a megfigyelési szorzattól függ. A NOAA Éghajlati Adatrekordját használó

elemzés az októbertől februárig tartó SCE növekedését mutatja (Hernández-Henríquez et al., 2015; Kunkel et al., 2016), míg a műholdakon elhelyezett optikai érzékelőkön (Hori et al., 2017) vagy a több megfigyelésen alapuló termékeken (Mudryk et al., 2020) alapuló elemzések negatív tendenciát mutatnak minden évszakban.

Az AR6 WGI 9. fejezete (1284. o.) arra mutat rá, hogy a NOAA klímaadat-nyilvántartása, amely az őszi és téli SCE növekedését mutatja, ellentmond a szárazföldi megfigyeléseknek és a modellalapú adatkészleteknek. Megjegyzi, hogy az optikai műholdképek használata a téli SCE megállapítására kihívást jelent a felhőzet és a téli hónapokban csökkenő napsugárzás miatt. A csendes-óceáni part menti államokra (CA, OR és WA) összpontosítva a hideg évszakban a tavasszal és nyáron elolvadó hegyi havazás a meleg évszak vízkészletének jelentős részét biztosítja. A fő forrásrégiók (Kaszkádok és Sierra Nevada hegység) havazásának átfogó rekonstrukciója az éves összesítésekben a 19. század vége óta nem mutat jelentős tendenciákat (Christy 2022).

Összefoglalva, a naprakész Rutgers SCE adatbázis eltérést mutat a modellek és a megfigyelések között. További munkára van szükség a megfigyelési adatkészletekben lévő ellentmondásos trendek összeegyeztetésére.

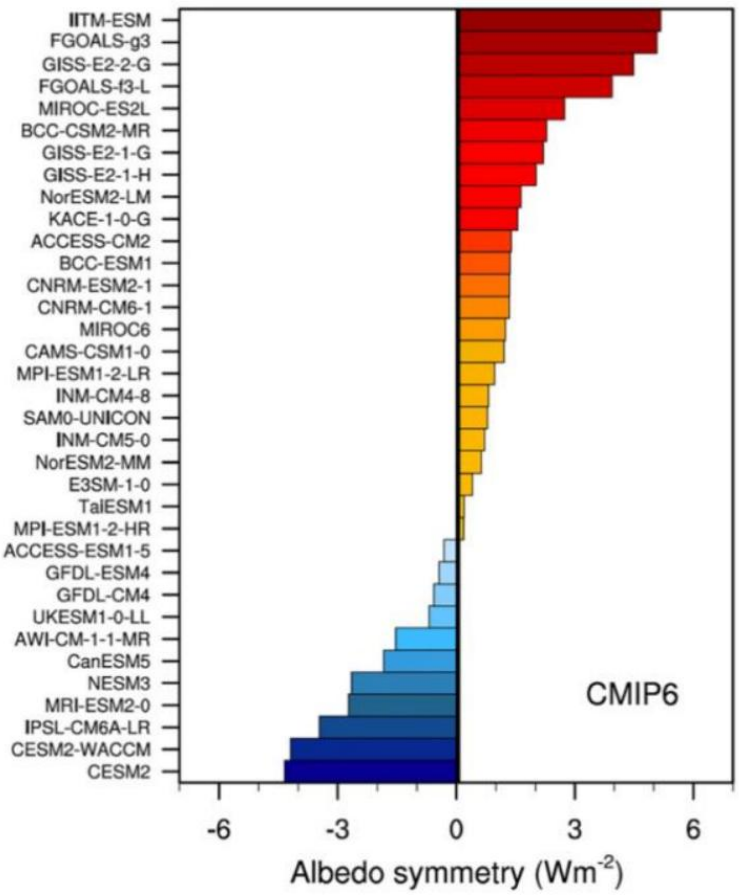
5.7 A planetáris albedó félgömbi szimmetriája

A bolygóalbedó a bejövő napsugárzásnak a Föld által az űrbe visszavert hányada. Fontos eleme a sugárzási energiaegyensúlynak, és befolyásolja, hogy a bolygó idővel felmelegszik-e vagy lehűl. A bolygóalbedót jellemzően 0,30 körüli értékre becsülik; a 0,01-es léptékű változások napenergia-kényszerben körülbelül 3 W/m^2-es változásnak felelnek meg, ami nagyobb, mint a jelenlegi antropogén kényszer. Régóta megfigyelték, hogy a modellek egymásnak és a globális bolygóalbedó értékével kapcsolatos megfigyeléseknek is ellentmondanak (Stephens et al. 2015).

A földi albedó érdekes tulajdonsága, hogy az északi félteke (NH) és a déli félteke (SH) közel azonos átlagos albedóval rendelkezik, legalábbis az ötven éve folyó műholdmegfigyelés szerint (Stephens et al., 2015). E szimmetria meglepő, mert az SH-n sokkal több óceán van, mint szárazföld. Mivel az óceán kevésbé fényvisszaverő, mint a szárazföld, az NH-nak nagyobb értékű albedóval kellene rendelkeznie. A felhőzet (ami erősen fényvisszaverő) gyakoribb az északi féltekén, és a két félteke felszíni albedóegyensúlyának eltérései a felhőzet által kompenzálódik. Datseris és Stephens (2021) kimutatták, hogy e felhőkompenzáció a déli félteke trópusvidéken kívüli viharpályáiból származik, amelyek felhősebbek, mint az északi féltekén. Bár ennek a féltekei szimmetriának a mechanizmusa nem tisztázott, valószínűleg nagy időbeli és térbeli léptékekben működik.

Az albedó féltekei szimmetriája az éghajlati modellekhez egy egyszerű bruttó mérőszámot szolgáltat. Rugenstein és Hakuba (2023) ezt a mérőszámot az északi és a déli félteke éves átlagos albedói közötti különbségként definiálták, a visszavert napfény Wm^{-2}-ben kifejezve, és feltüntették a CMIP6 éghajlati modellnevek mellett, ahogy az az 5.8. ábrán látható. A legtöbb CMIP6 modell nem adja vissza a megfigyelt kis aszimmetriát (kb. 0,1 Wm^{-2}), sőt abban sem értenek egyet, hogy melyik félteke veri vissza jobban a fényt. Ráadásul az aszimmetria nagysága egyes modellekben akár 5 Wm^{-2}-t is elérhet, ami a jelenlegi antropogén kényszernek kétszerese (körülbelül 2,7 Wm^{-2}).

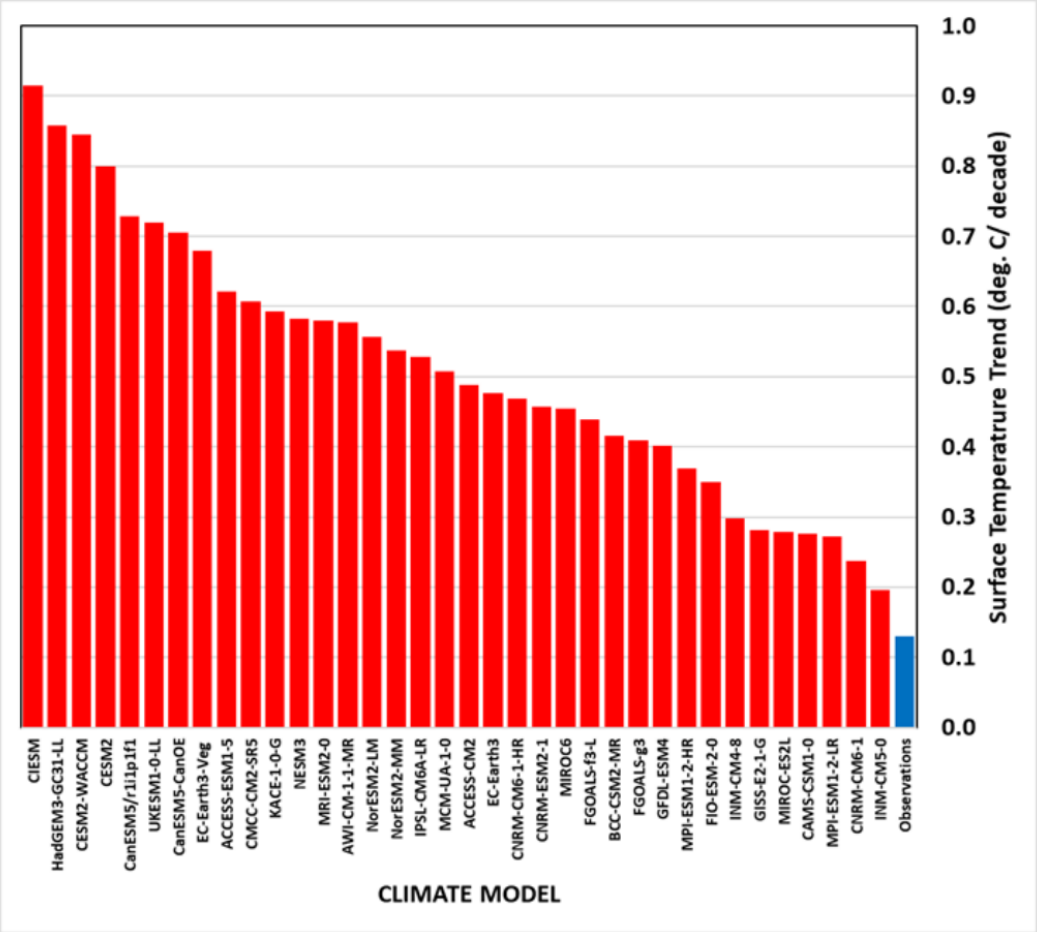
A nem fizikai albedóaszimmetriák jelentősége az éghajlati modellekben még nem teljesen ismert. Más modellvizsgálatok azonban arra utalnak, hogy az albedó féltekék közötti változásai megváltoztathatják a pólusok felé irányuló hőáramokat, a meridionális hőmérsékleti gradienseket, a viharosságot és a féltekei óceánok hőtárolási különbségeit. A modellek és a megfigyelések közötti eltérés további kérdéseket vet fel a felhő-visszacsatolási folyamatokkal kapcsolatban, és így még általánosabb érvénnyel csökkenti a jövőbeli éghajlat modell-előrejelzéseinek megbízhatóságát.



5.8. ábra: A 20 éves átlagos fényvisszaverőképesség (albedó) különbségei az északi és a déli félteke között a legutóbbi IPCC-értékelésben használt CMIP6 modellek esetében (színes oszlopok). A nagyon kis megfigyelt különbséget a függőleges fekete vonal jelzi. Rugenstein és Hakuba (2023) nyomán.

5.8 Az USA kukoricaövezete

A modellek és a megfigyelések közötti egyik legnagyobb eltérés az USA kukoricaövezetében található, ami a globális élelmiszertermelés szempontjából különösen fontos régiónak számít. Az 5.9. ábra a nyári (június, július, augusztus) felmelegedési trendeket mutatja a 12 államból álló kukoricaövezetben (IN, IA, IL, ND, SD, MO, MN, WI, MI, OH, KS, NE) 1973 és 2022 között. A megfigyelésekhez (kék) képest mind a 36 klímamodell (piros) túl gyors melegedést mutat.



5.9. ábra: Modellezett és megfigyelt felmelegedési trendek az USA kukoricaövezetében, 1973 és 2022 között.

Amint azt a 9. fejezetben tárgyaljuk, az emelkedő hőmérsékletnek az USA kukoricahozamára gyakorolt várható negatív hatásai mindmáig nem valósultak meg, ellentétben azokkal a széles körben nyilvánosságra hozott tanulmányokkal, amelyek azt állítják, hogy az elméleti jövőbeli hatások máris érzékelhetők (pl. Seager et al., 2018).

Az IPCC elismeri a regionális klímamodell-eredmények pontossági korlátait. Ez a példa azt mutatja, hogy a felhasználóknak a modell-előrejelzéseket esetileg kell gondosan értékelniük, mivel a helyi torzítások elég nagyok lehetnek ahhoz, hogy a modellek egyszerűen nem felelnek meg a célnak. Ahogy azt a modellező közösség két vezetője nemrégiben megjegyezte (kiemelés tőlem)

> … úgy véljük, hogy számos olyan kulcsfontosságú alkalmazás esetében, amely regionális klímamodell-kimenetet igényel, vagy a kis léptékű folyamatokból adódó nagyléptékű változások megítélésében **a modellek jelenlegi generációja a célnak nem felel meg**. (Palmer és Stevens 2019)

Összefoglalva:

• A klímamodellek az elmúlt néhány évtized számos reprodukálási vonatkozásában felmelegedési torzításokat mutatnak.

• Túl nagy felmelegedést mutatnak a felszínen (kivéve a legalacsonyabb ECS-értékű modelleket), túl nagy felmelegedést az alsó és középső troposzférában, valamint túl nagy felerősödést a magasban.

• Túl nagy sztratoszférikus lehűlést, túl sok hóveszteséget és túl nagy felmelegedést mutatnak az Egyesült Államok kukoricaövezetében.

• Az egyes klímamodellek féltekei albedókülönbsége a megfigyelésekhez képest az előjelet és a nagyságrendet illetően is széles skálán mozog. A W/m^2-ben kifejezett tartomány háromszor nagyobb a CO_2 által jelentett közvetlen antropogén kényszernél.

• Az IPCC elismert néhány efféle problémát, de nem mindegyiket.

Hivatkozások

Christy, J. R., R. T. McNider (2017). Satellite bulk tropospheric temperatures as a metric for climate

sensitivity. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences 53, 511-518. https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z

Christy, J. R. (2022). Time series construction of Oregon and Washington snowfall since 1890 and an update of California snowfall through 2020. Journal of Hydrometeorology 23, 1845-1860. https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0178.1

Connolly, R., M. Connolly, W. Soon, et al. (2019). Northern Hemisphere snow-cover trends (1967–2018): A comparison between climate models and observations. Geosciences 9, 135.

https://doi.org/10.3390/geosciences9030135

Datseris, G., B. Stevens (2021). Earth's albedo and its symmetry. AGU Advances 2, e2021AV000440. https://doi.org/10.1029/2021AV000440

Karl, T.R., S. J. Hassol, C. D. Miller, W. L. Murray, eds. (2006). Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences. U.S. Climate Change Science Program/Subcommittee on Global Change Research.

https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12017/m2/1/high_res_d/sap1-1-final-all.pdf

Klotzbach, P.J., R. A. Pielke, Sr., R. A. Pielke, Jr., J. R. Christy, R. T. McNider (2009). An alternative explanation for differential temperature trends at the surface and in the lower troposphere. Journal of Geophysical Research — Atmospheres 114(D21).

https://doi.org/10.1029/2009JD011841

McKitrick, R. and J. R. Christy (2020). Pervasive warming bias in CMIP6 tropospheric layers. Earth and Space Science 7. https://doi.org/10.1029/2020EA001281

McKitrick, R., and J.R. Christy (2025), "Data and Code for DoE Report 2025", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/8n9ks93vn7.1

Palmer, T., and B. Stevens (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 116(49), 24390–24395. https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116

Philipona, R., C. Mears, M. Fujiwara, et al. (2018). Radiosondes show that after decades of cooling, the lower stratosphere is now warming. Journal of Geophysical Research—Atmospheres 123. https://doi.org/10.1029/2018JD028901

Rugenstein, M., and M. Hakuba (2023). Connecting hemispheric asymmetries of planetary albedo and surface temperature. Geophysical Research Letters 50, e2022GL101802. https://doi.org/10.1029/2022GL101802

Santer B D, P.W. Thorne, L Haimberger et al. (2008) Consistency of modelled and observed temperature trends in the tropical troposphere International Journal of Climatology 28 1703–22 https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.1756

Santer, B.D. S. Po-Chedley, L. Zhao, C et al. (2023) Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature, Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 120 (20) e2300758120, https://doi.org/10.1073/pnas.2300758120

Scaffeta, N (2023) CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures. Climate Dynamics 60, 3091–3120 (2023). https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w

Seager, R., J. Feldman, N. Lis, et al. (2017). Whither the 100th meridian? The once and future physical and human geography of America's arid–humid divide. Part II: The meridian moves east. Earth

Interactions 22. https://doi.org/10.1175/EI-D-17-0012.1

Spencer, R. W. (2024). Global warming: Observations vs. climate models. Environment Backgrounder, The Heritage Foundation. https://www.heritage.org/environment/report/global-warming-observations-vs-climate-models

Stephens, G. L., D. O'Brien, P.J. Webster et al. (2015). The albedo of Earth. Reviews of Geophysics. https://doi.org/10.1002/2014RG000449

Vogelsang, T. and N. Nawaz (2016). Estimation and inference of linear trend slope ratios with an application to global temperature data: Journal of Time Series Analysis 38. https://doi.org/10.1111/jtsa.12209

6 SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS

Fejezet-összefoglaló

A rendelkezésre álló történelmi adatokhoz képest a szélsőséges időjárás legtöbb megnyilvánulása nem mutat statisztikailag szignifikáns, hosszú távú tendenciát. Bár az 1950-es évek óta az Egyesült Államokban több lett a forró napok száma (amint azt az AR6 hangsúlyozza), e szám az 1920-as és 1930-as évekre jellemzőkhöz képest még mindig alacsony. A konvektív (függőleges légáramlással járó) szélsőséges viharok, hurrikánok, tornádók, árvizek és aszályok jelentős természetes változékonyságot mutatnak, de hosszú távú növekedés az észlelések szerint nincsen. Egyes régiókban rövid időközönként kimutatható a szélsőséges csapadékesemények számának növekedése, de tartós és regionális trend nem alakul ki. A tűzvészek nem gyakoribbak az Egyesült Államokban, mint az 1980-as években voltak. A leégett terület nagysága az 1960-as évektől a 2000-es évek elejéig nőtt, azonban a becsült természetes alapszinthez képest még mindig kicsiny. Az Egyesült Államokbeli tűzvész-aktivitás (gyakoriság és területi kiterjedés) erősen függ az erdőgazdálkodás gyakorlatától.

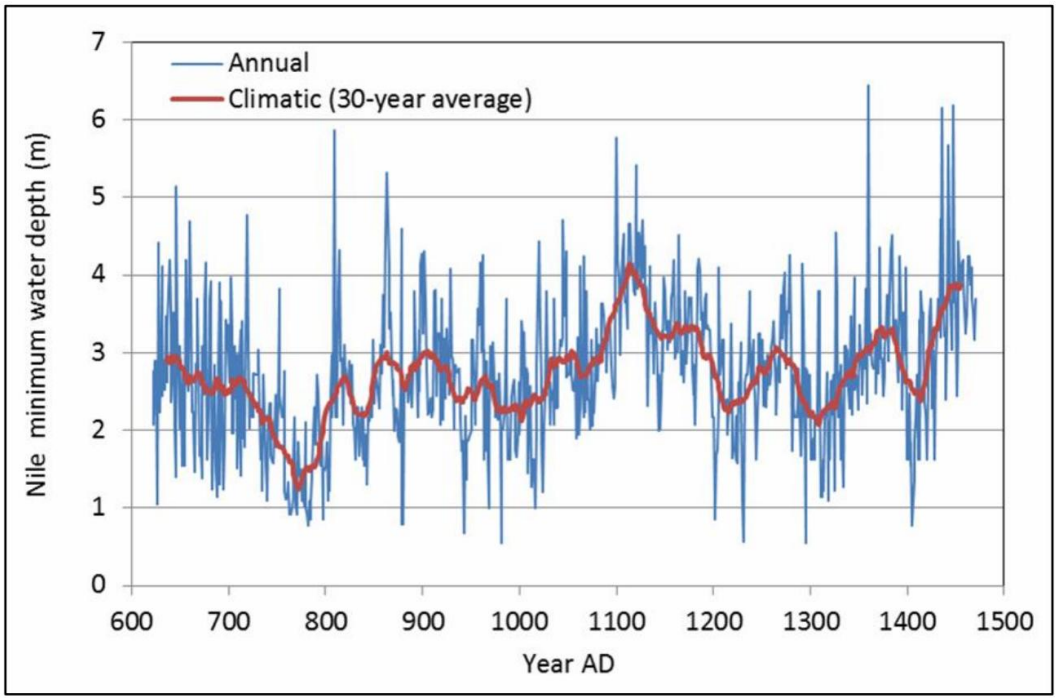
6.1 Bevezetés

A nagy hatású időjárási szélsőségek, amelyek általában a hőmérséklettel, a csapadékkal és/vagy az erős széllel kapcsolatosak, megzavarhatják az infrastruktúrát, és ezáltal veszélyeztethetik az emberi egészséget és a jólétet. A kérdés nem az, hogy bekövetkeznek-e szélsőségek. Inkább az, hogy vannak-e a szélsőségek gyakoriságában vagy jellegében hosszú távú (évtizedes léptékű) változások („észlelés”), valamint az, hogy milyen mértékben okozza ezeket a változásokat és a veszélyekben bekövetkező változásokat az antropogén üvegházgáz-kibocsátás („attribúció”; pl. AR6 Seneviratne et al. 2021).

Annak az állítására, hogy a felmelegedés súlyosbítja a szélsőséges időjárási eseményeket, az ún. folyamatalapú megértésre és egyszerű termodinamikai érvekre hivatkoztak. Naivitás azonban azt feltételezni, hogy a közelmúltbeli szélsőséges események bármelyikét az éghajlatra gyakorolt emberi hatás okozta volna. Az éghajlat az időjárás évtizedek alatti statisztikai tulajdonságairól szól, nem pedig egyszeri eseményekről. Továbbá statisztikai elemzésre csak körülbelül 130 évnyi megbízható megfigyelési adat áll rendelkezésre. Ez a rövid időszak még nem tartalmazza az összes szélsőséges eseményt, amelyet az éghajlati rendszer önmagában képes létrehozni. A geológiai idők során az éghajlati rendszer (lényegében) végtelen sokféle időjárási mintázatot és szélsőséget generált, és mivel ezekről nem történt ember általi megfigyelés, így hiányoznak az extrém statisztikák meghatározásához használt adatbázisokból [lásd alább: *A rövid adatrekordok veszélyei*]. Emiatt egy eddig példa nélküli szélsőséges esemény hozzárendelése feltételezéseket igényel a természetes változások nagyságrendjére vonatkozólag.

Ez a fejezet az extrém időjárás trendjeinek észlelésével foglalkozik, míg a 8. fejezet az okokozati hozzárendelést vizsgálja, a 8.4. szakasz pedig kifejezetten a szélsőséges időjárással foglalkozik. Ha nem észlelünk trendet, akkor egyértelműen nincs alapja a hozzárendelésnek. De még ha meg is figyelhető egy trend, nem feltétlenül következik, hogy az az ember által okozott felmelegedésnek tulajdonítható.

Különösen igaz ez a csapadékeseményekre. A hidrológiai szakirodalombanrégóta tudott, hogy a csapadékadatokban hosszú ideig tartó, lassú és szabálytalan oszcillációk vannak jelen (Hurst 1951, Cohn és Lins 2005, Markonis és Koutsoyiannis 2016). A változékonyság pontos becsléséhez az efféle természetes mintázati jellemzők hosszú megfigyelést igényelnek. A természetes változékonyság időmértékéhez képest rövid feljegyzések elemzése hajlamossá tesz a trendek félreértelmezésére, túlbecsülve a ma megmutatkozó trendek jelentőségét és alábecsülve a szélsőséges események valószínűségét (Cohn és Lins 2005)



6.1.1. ábra: A Nílus folyó éves minimummélysége Kairó közelében több mint 650 éven keresztül, Kr. u. 622-től 1284-ig. A méterben mért adatok a hosszabb távú trendek körüli évenkénti ingadozások jellegzetes mintázatát mutatják. Koutsoyiannis (2013) adatai

Jó példa erre a Nílus folyó éves minimummagasságának nyolc évszázados feljegyzése, amelyet Kairó Roda-szigetén figyeltek meg, és amely a 6.1.1. ábrán látható. A Nílus folyót egy 4 millió négyzetmérföldes vízgyűjtő medencében hulló csapadék táplálja, ami a CONUS körülbelül egyharmadának felel meg. Mivel az emberi hatás a globális éghajlatra jóval a 20. század előtt biztosan elhanyagolható volt, a harmincéves átlag évszázados léptékű változékonysága teljesen természetes eredetű; a hetedik és nyolcadik századi egyiptomiak tévesen feltételezték volna, hogy az akkoriban súlyosbodó aszály lenne az „új normális”.

Ezeket a fenntartásokat szem előtt tartva vizsgáljuk meg a kiválasztott időjárási és éghajlati szélsőségek változására vonatkozó bizonyítékokat. Visszatérő téma a közvélemény és a tudományos bizonyítékok közötti széles szakadék. A médiatudósításokban, a kormányzati és a magánszektorbeli tárgyalásokon, sőt egyes tudományos szakirodalomban is rutinná váltak az általánosító kijelentések, miszerint mindenféle szélsőséges időjárás az üvegházhatású gázok és a „klímaváltozás” miatt súlyosbodik. A szakértői értékelések azonban jellemzően nem vonnak le ilyen átfogó következtetéseket, ehelyett a konkrét trendek beazonosításában, valamint az antropogén kényszerrel való ok-okozati összefüggés megállapításában rejlő nehézségeket hangsúlyozzák.

A következő fejezetekben részleteket közlünk különféle IPCC és NCA értékelő jelentésekből, a forrásokat a következőképpen jelölve:

SREX: Az IPCC különjelentése a szélsőséges események és katasztrófák kockázatkezeléséről az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás előmozdítása érdekében (2012).

AR6: Az IPCC hatodik értékelő jelentése, 1. munkacsoport (2021).

NCA4: Az Egyesült Államok klímatudományi különjelentése a negyedik nemzeti éghajlati értékelésről (2017), I. kötet.

NCA5: Ötödik nemzeti éghajlati értékelés (2023).

A részletekben a dőlt betűs rész az eredetiből való, a félkövér kiemelés tőlünk származik. Ezenkívül, ahol lehetséges, a 2024-ig terjedő időszakra vonatkozó információk megadásához standard kormányzati forrásokat használunk.

6.2 Hurrikánok és trópusi ciklonok

Az AR6 a következő értékelést nyújtja a trópusi ciklonokról (TC; itt a hurrikánok szinonimájaként használjuk):

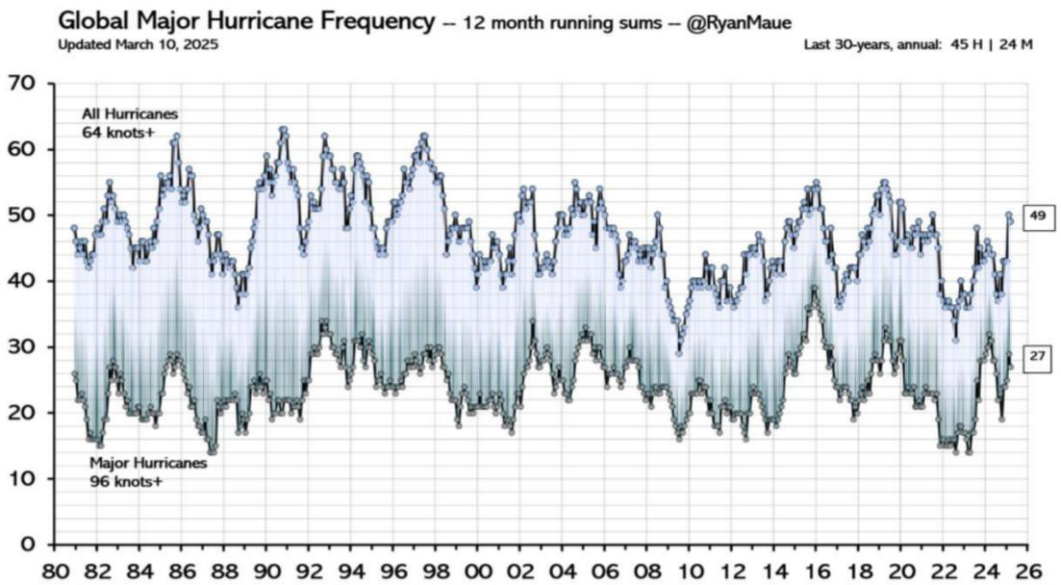
> AR6: A legtöbb jelentett hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trend TC gyakoriságát vagy intenzitásalapú mérőszámát illetően *alacsony megbízhatóságú,* ugyanis a legjobb nyomon követési adatok gyűjtésére használt technológia megváltozott. (IPCC, 2021. 1585. o.)

> AR6: *Valószínű,* hogy a nagyobb (3.–5. kategóriájú) trópusi ciklonok előfordulásának globális aránya az elmúlt négy évtizedben nőtt... *Alacsony a megbízhatósága* a hosszú távú (több évtizedestől százévesig terjedő) trendeknek az összes kategóriájú trópusi ciklonok gyakoriságát illetően (IPCC, 2023. SPM. 9. o.)

> AR6: A legjobb nyomon követési adatok egy részhalmaza, amely az Egyesült Államokat 1900 óta közvetlenül érintő hurrikánoknak felel meg, megbízhatónak tekinthető, és **az amerikai partot elérő események gyakoriságában nem mutatkozik trend**. (IPCC 2021, 1585. o.)

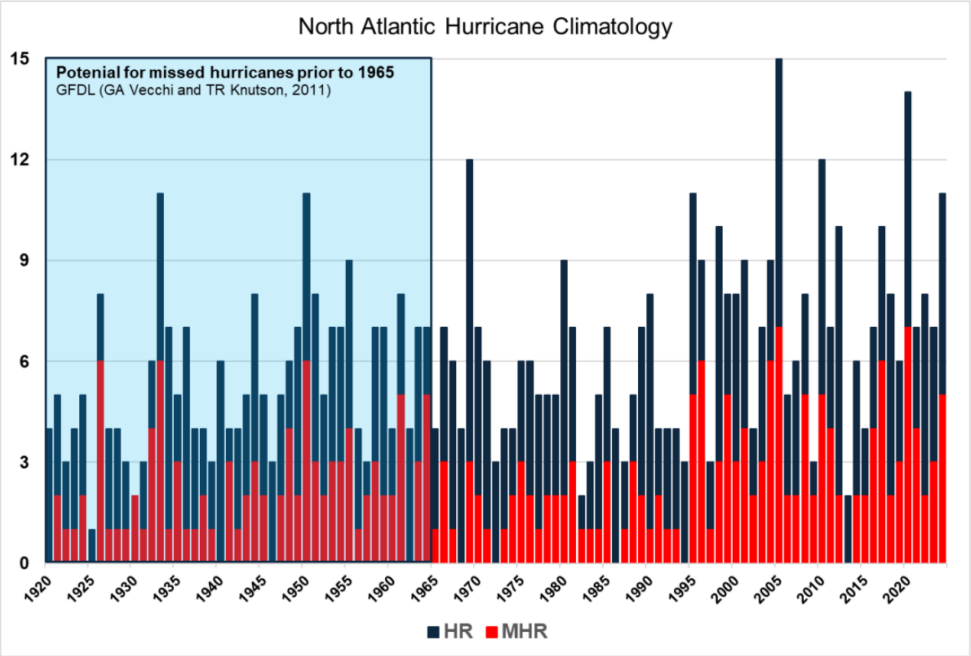
1980 óta, amióta a műholdas megfigyelések teljes mértékben lefedik a globális óceánokat, bizalommal elfogadhatjuk a globális hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) teljes számára vonatkozó adatokat. A 6.2.1. ábra azt mutatja, hogy átlagosan évente körülbelül 50 hurrikán fordul elő, amelyek közül körülbelül 25 éri el a nagyobb hurrikán státuszt (Maue, 2025). Jelentős éves és évtizedes változékonyság figyelhető meg, a hurrikánok számában enyhe csökkenés, a nagyobb hurrikánok számában pedig enyhe, de jelentéktelen növekedés tapasztalható. Ez a két trend együttesen összességében a nagyobb hurrikánok arányának növekedését eredményezi.

A globális hurrikánstatisztikát a Csendes-óceán északnyugati része uralja, amely a teljes globális hurrikánszám ~35 százalékát teszi ki, míg az Atlanti-óceán a globális hurrikánok ~15 százalékát adja (Colorado Állami Egyetem, 2025). Az Atlanti-medencére vonatkozó adatok messzebbre nyúlnak vissza, mint a többi óceánmedencére vonatkozó adatok, és az amerikai politikai döntéshozók számára ezek a legrelevánsabbak.



6.2.1. ábra: A hurrikánok és a nagyobb hurrikánok globális gyakorisága 1980 óta. Forrás: Frissítve Maue 2011 alapján.

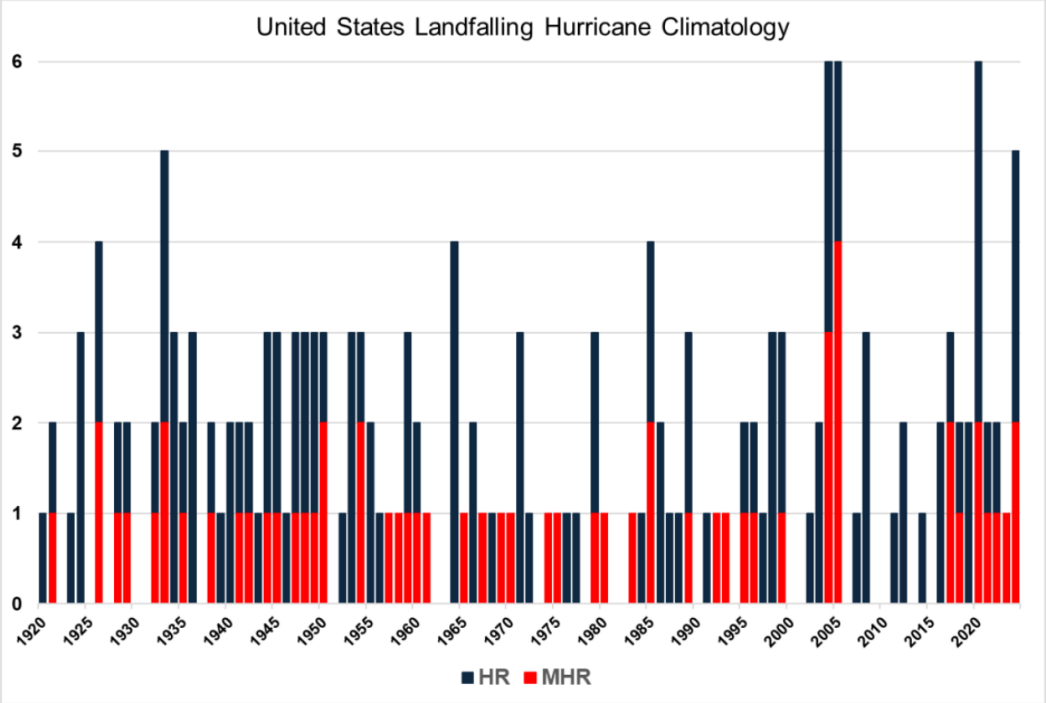
A 6.2.2. ábra az atlanti hurrikánok és a nagyobb hurrikánok (3. kategóriájú és magasabb kategóriájú) gyakoriságát mutatja 1920-ig visszamenőleg. Az 1965 előtti adatok (a műholdas megfigyelések kezdete az Atlanti-óceánon, kékkel árnyékolva) némi alulszámlálásról tanúskodnak, az 1920 előtti adatok pedig jelentős alulszámlálást mutatnak (Vecchi és Knutson, 2011). Az atlanti hurrikánaktivitás minden mérése 1970 óta jelentős növekedést mutat. Az 1971 és 1994 közötti időszakban azonban kivételesen alacsony aktivitás volt megfigyelhető, míg magas aktivitás (az elmúlt két évtizedhez képest, még alulszámlálással is) megfigyelhető volt az 1950-es és 1960-as években, sőt az 1930-as években is.



6.2.2. ábra: Hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) atlanti gyakorisága 1920 óta. Forrás: National Hurricane Center (2024)

A 6.2.2. ábra azt mutatja, hogy az atlanti hurrikánok évtizedes és több évtizedes időléptékekben erősen változnak. E változások elsősorban az Atlanti Többévtizedes Oszcillációhoz (AMO) kapcsolódnak, amely a medence egészére kiterjedő tengerfelszín-hőmérséklet és tengerszint nyomásingadozásokban nyilvánul meg, amelyek nagyléptékű óceáni cirkulációs mintázatokhoz kapcsolódnak. Az AMO 1926-1970 között és 1995-től mostanáig meleg fázisú, de 1971-1994 között hűvös fázisú volt. Ez van a legnagyobb hatással van a nagyobb hurrikánok (3+ kategória) számára, amelyeket Goldenberg et al. (2001) a normálisnál nagyobb SST-kkel és a csökkent függőleges nyírással társítottak az AMO meleg fázisában (lásd még: Bell és Chelliah, 2006; Klotzbach et al., 2018).

Klotzbach et al. (2018) átfogó értékelést végzett az Egyesült Államok kontinentális részén 1900 óta partot ért hurrikánok adatairól. A 6.2.3. ábra 2024-ig frissíti elemzésüket. Míg a partra jutó hurrikánok legnagyobb száma 2004-ből, 2005-ből és 2020-ból származik, 1920 óta nincs statisztikailag szignifikáns tendencia. A 6.2.3. ábra a nagyobb hurrikánok partra érésének idősorait is mutatja (3-5. kategória). A feljegyzések szerint a legintenzívebb év 2005 volt (4 nagyobb hurrikán jutott partra). 2005 után azonban 2016-ig nem volt nagyobb hurrikán az Egyesült Államokban, ami a leghosszabb ilyen időszak 1920 óta.



6.2.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli hurrikánok (HR) és nagyobb hurrikánok (MHR) partra jutási gyakorisága 1920 óta. Forrás: NOAA HRD(a) (2024)

A 6.2.3. ábra az Egyesült Államokbeli partra jutási aktivitás jelentős évközi és több évtizedes változékonyságát mutatja. Klotzbach et al. (2018) megvizsgálta, hogyan változnak a partra jutások számai az ENSO (El Niño vs. La Niña) és az Atlanti-óceáni Többévtizedes Oszcilláció (AMO) meleg és hideg fázisai szerint.

Villarini et al. (2012) az Egyesült Államokbeli hurrikánok partra jutásának elemzését nyújtja 1878-ig visszamenőleg. Bár lehetséges, hogy a 19. század végén néhány partrajutás kimaradt a Mexikói-öböl partvidékének ritkán lakott területei miatt, figyelemre méltó, hogy a teljes feljegyzésben a legintenzívebb év 1886, 7 hurrikán partra jutásával, amikor még az éghajlatra kifejtett emberi hatások sokkal kisebbek voltak, mint manapság.

A 6.2.1. táblázat a 10 legerősebb hurrikánt (és a holtversenyeket) mutatja, amelyek az Egyesült Államok partját érték. Azok közül a hurrikánok közül, amelyek tartósan 240 km/h-nál nagyobb széllel értek partot, a 21. században csak egy fordult elő.

Összefoglalva, a hurrikánaktivitás globális és regionális változékonyságának, valamint trendjeinek elemzése alapot nyújt a változások észleléséhez és okok megértéséhez. A hurrikánaktivitás viszonylag rövid történelmi feljegyzése, és a még rövidebb műholdas korszakból származó feljegyzés nem elegendő annak megállapításához, hogy a közelmúltbeli hurrikánaktivitás szokatlan-e a háttér természetes változékonyságához képest. Az atlanti hurrikánfolyamatokat jelentősen befolyásolják az Atlanti-óceán óceáni cirkulációjának természetes módozatai, nevezetesen az Atlanti-óceán Többévtizedes Oszcillációja (AMO). Bár régóta feltételezik, hogy a globális tengerfelszín-hőmérséklet emelkedése a hurrikánok intenzitásának növekedését okozza, a hurrikánadatokban bármilyen jelentős trend azonosítását akadályozza a rövid adathalmaz és a jelentős természetes változékonyság.

A folyamatalapú megértés azt is sugallja, hogy a hurrikánokból származó viharhullámoknak és csapadékmennyiségnek a melegebb hőmérséklettel növekednie kellene. Azonban a változó partszakaszokra érkező hurrikánok viszonylag kis száma és az egyes viharokhoz kapcsolódó összetett dinamika kizárja a változások érdemi kimutatását.

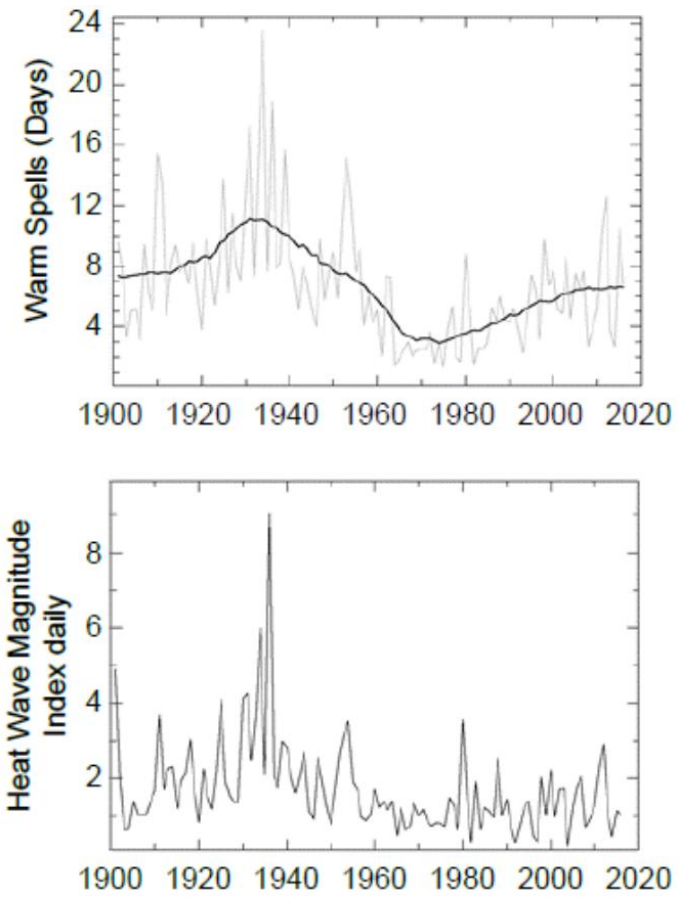
Rank	Year	Landfall Wind (MPH)	Name
1	1935	185	"Labor Day"
2	1969	175	Camille
3	1992	165	Andrew
4	2018	160	Michael
5	1856	150	"Last Island"
5	1886	150	"Indianola"
5	1919	150	---------
5	1932	150	"Freeport"
5	2004	150	Charley
5	2020	150	Laura
5	2021	150	Ida
5	2022	150	Ian

6.2.1 táblázat: Az USA partjai mentén szárazföldre kijutó legerősebb hurrikánok. Forrás: (NOAA HRD(b), 2024)

6.3 Hőmérsékleti szélsőségek

Az AR6 értékelés az 1950 utáni időszakra összpontosított, és a hőhullámok gyakoriságának és intenzitásának növekvő tendenciáiról számolt be. Az NCA4 azonban megjegyezte, hogy az Egyesült Államokban a hőhullám-aktivitás az 1930-as években érte el csúcspontját (6.3.1. ábra).

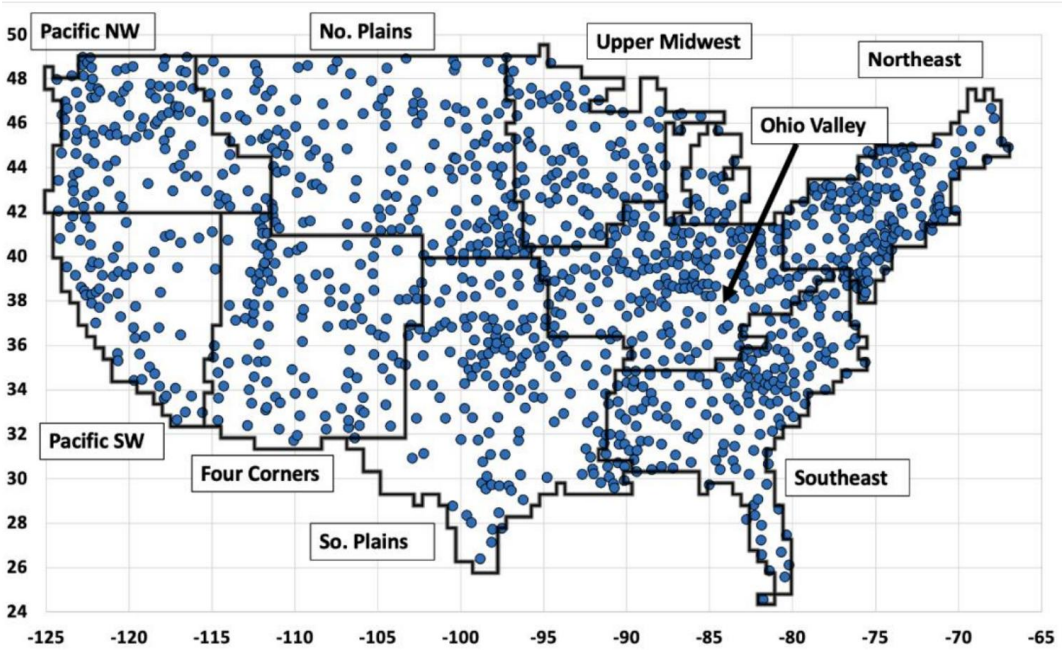
> AR6: *Gyakorlatilag biztos*, hogy a meleg szélsőségek (beleértve a hőhullámokat is) az 1950-es évek óta gyakoribbak és intenzívebbek lettek a legtöbb szárazföldi régióban, míg a hideg szélsőségek (beleértve a hideghullámokat is) ritkábbak és kevésbé súlyosak lettek. (SPM, A3.1)
>
> AR6: Észak-Amerikában nagyon erős bizonyítékok vannak a meleg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának *nagyon valószínű* növekedésére, valamint a hideg szélsőségek intenzitásának és gyakoriságának csökkenésére az egész kontinensen, bár a trendekben jelentős térbeli és szezonális eltérések vannak. A minimumhőmérsékletek a kontinensen következetes melegedést mutatnak, míg az USA egyes részein a napi hőmérsékletek éves maximum értékében ellentétesebb trendek figyelhetők meg. (11. fejezet, 1550. o.)
>
> NCA4: A meleg szélsőségek változásai árnyaltabbak, mint a hideg szélsőségeké. Például az elmúlt évszázadban az év legmelegebb napi hőmérséklete a Nyugat egyes részein **emelkedett**, de a Sziklás-hegységtől keletre szinte minden helyen **csökkenés volt** megfigyelhető. Valójában minden keleti régió nettó **csökkenést tapasztalt**, leginkább a Középnyugaton (kb. 1,2°C) és a Délkeleten (körülbelül 0,8°C). (190-191. o.)
>
> NCA4: Az 1960-as évek közepe óta az év legmelegebb napi hőmérséklete csak nagyon kis mértékben emelkedett (nagy éves eltérések közepette). A hőhullámok (6 napos időszakok, amelyekben a maximális hőmérséklet a 90. percentilis felett volt 1961–1990 között) gyakorisága az 1930-as évek közepéig nőtt, az 1960-as évek közepére jelentősen ritkábbá váltak, majd ezt követően ismét növekedett a gyakoriságuk. A meleg napi hőmérsékletekhez hasonlóan **a hőhullámok nagysága is az 1930-as években érte el a maximumát. (190-191. o.)**



6.3.1. ábra: Hőhullámok az Egyesült Államokban 1900 óta. Forrás: NCA4 6.4. ábra

6.3.1 Az Egyesült Államokban a hőmérséklet egyre kevésbé szélsőséges

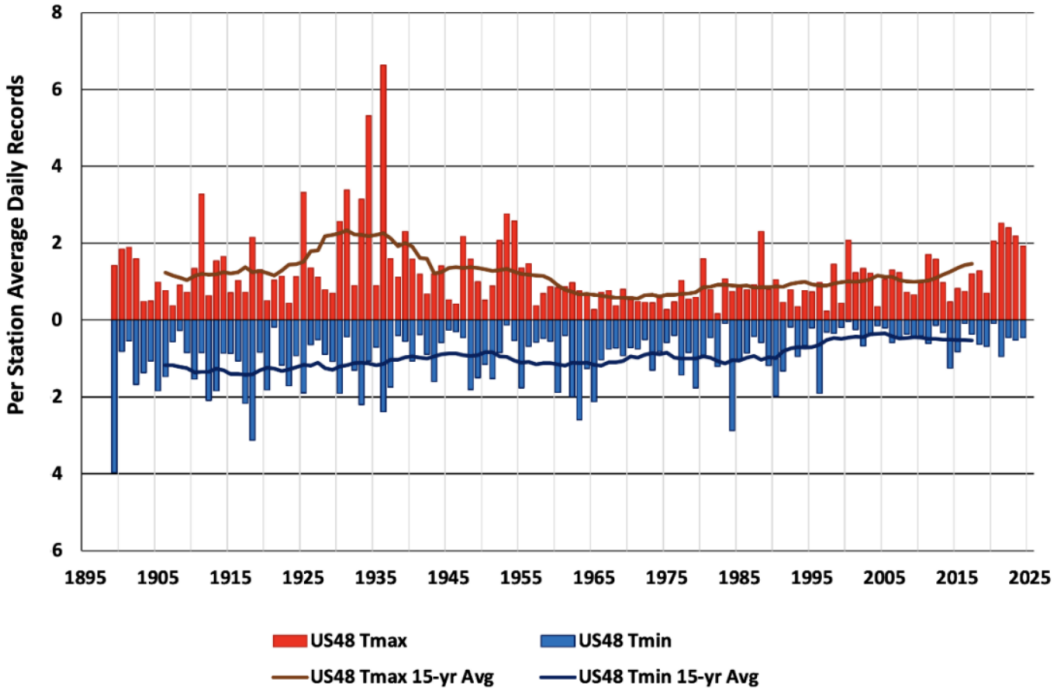
A meleg évszak napi maximumhőmérsékletei (Tmax, május-szeptember) és a hideg évszak napi minimumhőmérsékletei (Tmin, december-március) 1898 decemberétől (126 év) kezdődően állnak rendelkezésre. Az adatkészlet 1211 CONUS állomásból áll, amelyeket az Egyesült Államok Történelmi Éghajlati Hálózatának vagy USHCN állomásoknak neveztek el (lásd 6.3.2. ábra; Quinlan et al. 1987, Karl et al. 1990). Ezeket az állomásokat a NOAA választotta ki, mivel a legkevésbé problémásak az adatkimaradások, az állomásáthelyezések és a műszercserék tekintetében. Ahol még mindig hiányosságok vannak, a közeli állomásokat összevonták (a torzítást korrigálva), így az állomások esetében elérhető medián adatmennyiség 98%. Bár az adatkészletben vannak hibák, beleértve a az UHI hatások által okozott, feldolgozatlan hamis felmelegedést is, és amelyek a Tmin megfigyelését különösen torzítják, ez az adatkészlet a Tmax hőszélsőségek trendjeinek felméréséhez kellően pontos.



6.3.2. ábra: Az USHCN hőmérsékleti állomásainak helyszínei. Forrás: USHCN.

Azzal a kérdéssel kezdjük, hogy vajon változott-e a napi rekordmagas vagy alacsony hőmérsékletek előfordulása 1898 decembere óta. Minden meleg évszak 153 napból áll (május 1. és szeptember 30. között), és minden hideg évszak 122 napból (december 1. és március 31. között). Minden állomásra és napra kiszámítottuk azt az évet, amelyben a rekordmagas (legalacsonyabb) hőmérséklet előfordult. 126 évnyi megfigyelés alapján, ha nem lennének hőmérsékleti trendek az idő múlásával, a Tmax várható rekordszáma állomásonként és évente 1,21 (=153/126), a Tmin esetében pedig állomásonként és évente 0,96 (=122/126) lenne.

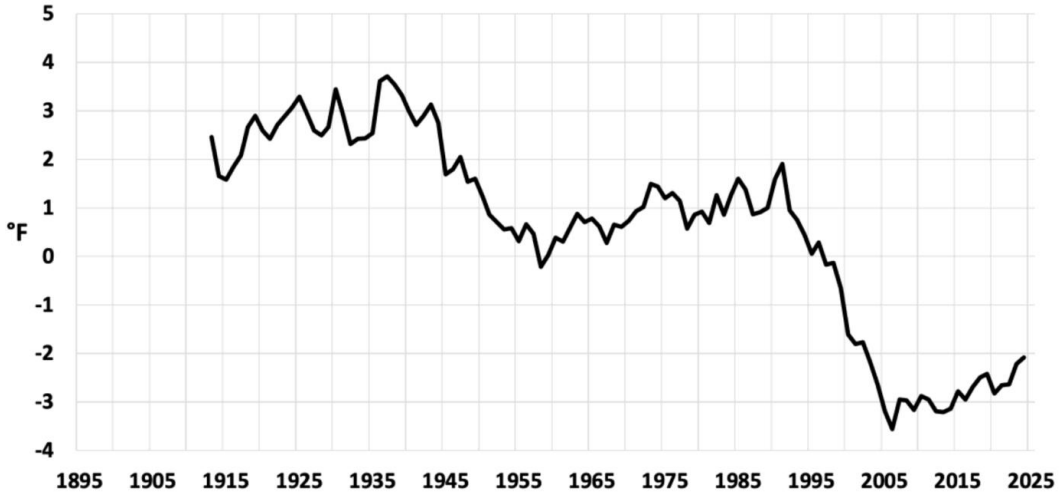
A 6.3.3. ábra ezen extrém események előfordulásának időbeli eloszlását mutatja. A CONUS meleg évszakos szélsőségeinek számos mérőszámában van egy közös vonás - az 1920-as és különösen az 1930-as évek kivételes hősége, amely 1936-ban tetőzött. Állomásonkénti átlagban a Tmax rekordok 60 százaléka és a Tmin rekordok 59 százaléka az időszak első felében (1899-1961 között) történt.



6.3.3. ábra: A napi rekordok száma a meleg és hideg évszakokban a CONUS-ban. A vonalak a 15 éves, középre igazított átlagot jelölik. Forrás: 1211 USHCN állomás, a megfigyelések legalább 92 százalékának eléréséhez az 1898 decembere óta eltelt 126 éves időszakban szükség szerint kiegészítve. US48: összefüggő amerikai államok. Tmax: maximum hőmérséklet. Tmin: minimum hőmérséklet.

A hideg oldalon a CONUS által tapasztalt legkiterjedtebb hideg szélsőség az 1899 februárjában, Bálint-napon bekövetkezett sarkvidéki betörés volt. A második helyen az 1917-es betörés áll. A hidegrekordok gyakorisága csökkent, különösen az időszak utolsó negyedében, amikor a szélsőséges hidegeseményeknek csak 13 százalékát mérték. Ezzel szemben az utolsó negyedben a szélsőséges Tmax rekordok 25 százalékot értek el, a statisztikai várakozásoknak megfelelően. Ezeket az általános jellemzőket a korábbi értékelések is kimutatták (lásd fent, IPCC AR6, NCA4). A két előzmény kombinálásával a hideg és meleg szélsőségek számának összességében bekövetkezett csökkenése az elmúlt évszázadban egy olyan éghajlatra utal, amely kevésbé hajlamos a szélsőségekre.

Ez a mintázat látható a 6.3.4. ábrán is. Az összes állomásra és mindegyik évre kiszámították a legmelegebb meleg évszak és a leghidegebb hideg évszak hőmérsékleteit. Ezután állomásonként kiszámították a különbségeket, és földrajzilag átlagolták az összes állomáson, így megkapták az egyes évekre vonatkozó helyi szélsőséges hőmérsékletek várható tartományának éves mértékét. A 6.3.4. ábra ennek a mutatónak a 15 éves utolsó átlagát mutatja, ami az elmúlt évszázadban egyértelműen csökkent.



6.3.4. ábra: Az egyes állomások legmelegebb meleg évszaki Tmax és leghidegebb hideg évszaki Tmin értékei közötti különbség 15 éves, a hosszú távú átlaghoz viszonyított különbségének átlaga. Forrás: Szerzői elemzés az USHCN adatai alapján.

Az egyes állomások legmelegebb nyári Tmax és leghidegebb téli Tmin értékei közötti átlagos különbség az elmúlt 126 évben körülbelül 5°F-kal csökkent. A csökkenés főként a melegebb téli Tmin értéknek köszönhető, de a nyári Tmax csökkenése is szerepet játszik. A Tmin emelkedése szorosan összefügg a meteorológiai állomások körüli mesterséges felületek növekvő jelenlétével az elmúlt több mint 100 évben (az úgynevezett városi hősziget-hatás; 3.3. szakasz, Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, valamint Spencer et al. 2025).

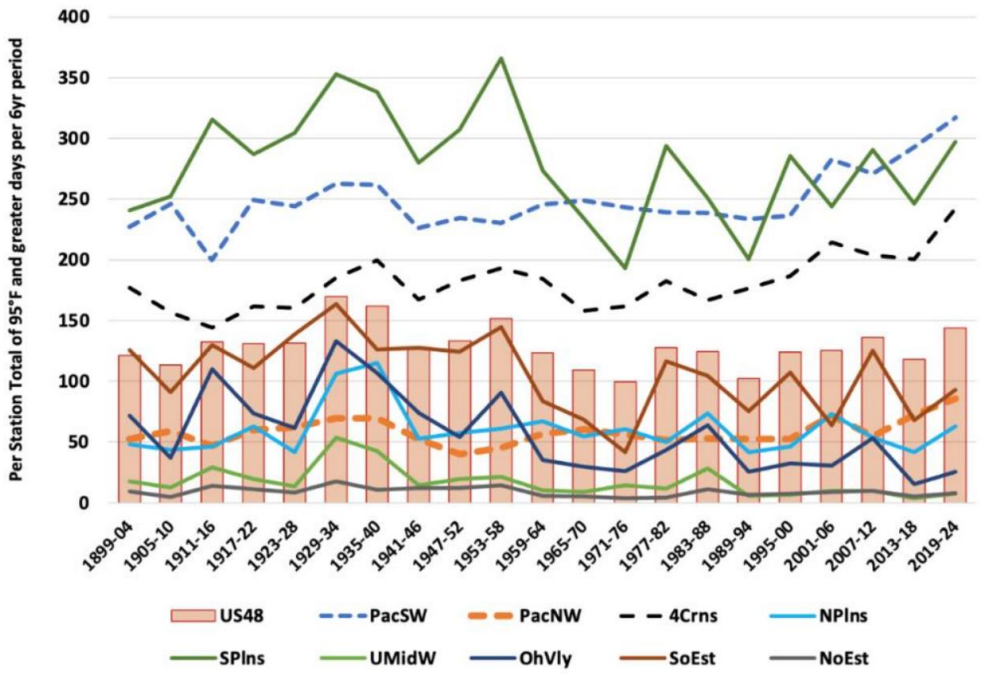
Összefoglalva, míg az Egyesült Államokban rendszeresen tapasztalhatók szélsőséges hőmérsékleti események, és nagy médiafigyelmet kapnak, a hosszú távú feljegyzések azt mutatják, hogy az Egyesült Államok éghajlata az idő múlásával kevésbé szélsőségessé (enyhébbé) vált, ha a meleg évszak maximumai és a hideg évszak minimumai közötti tartományt mérjük.

6.3.2 Hőküszöb-túllépések

„A szélsőséges hőmérsékleti események kockázata változik” címszó alatt a legfrissebb amerikai nemzeti éghajlat-értékelő jelentés (NCA5) megjegyzi a 95°F-os vagy annál magasabb hőmérsékletű napok száma küszöbértékének növekedését, kijelentve:

> Az Egyesült Államok nyugati részét az 1980-as évek óta különösen sújtja a szélsőséges hőség..., a 95°F feletti napok számának nagyobb növekedését tapasztalva, ami várható is volt a régióban a keleti USA-hoz képest nagyobb mértékű felmelegedés miatt. 2018 óta számos jelentős hőhullám sújtotta az Egyesült Államokat, köztük egy rekordot döntő esemény a Csendes-óceán északnyugati részén, 2021-ben.

Változik-e a 95°F-os napok előfordulása? Egy olyan változatos éghajlaton, mint a CONUS, a küszöbérték statisztikák félrevezetőek lehetnek. Egy olyan régióban, ahol sok állomás nyáron 95°F-hoz közeli Tmax átlaghőmérséklettel rendelkezik, a metrikában nagy ingadozások tapasztalhatók, amennyiben csak kis változások történnek az átlaghőmérsékletben. Másutt, ahol az állomások ritkán érik el, vagy gyakorlatilag mindig elérik a 95°F Tmax hőmérsékletet, egy kis változásnak nincs nagy hatása az eredményekre.



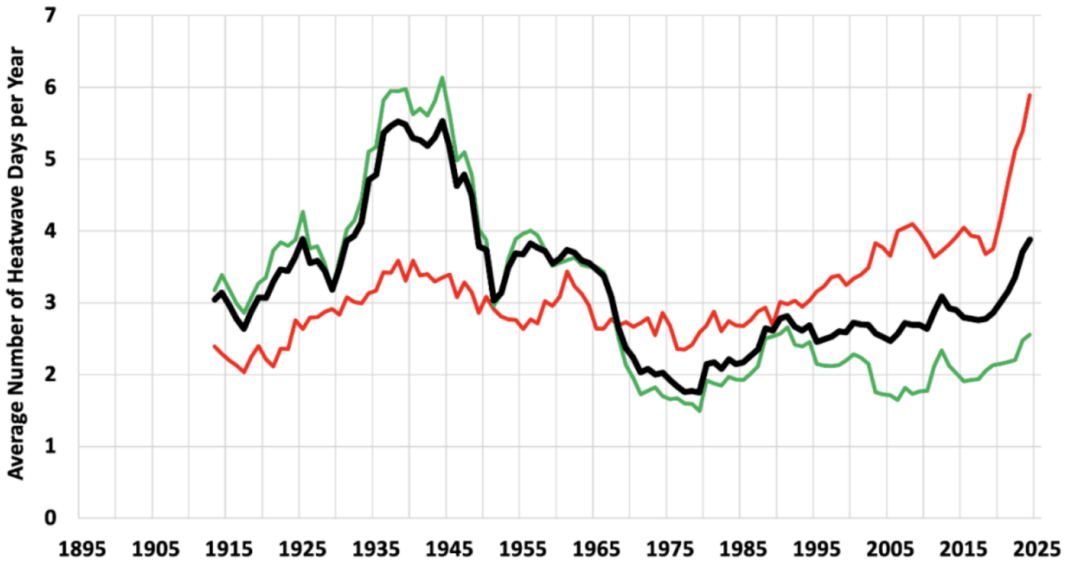
6.3.5. ábra: ≥ 95°F napok száma 6 éves időszakokban, USA 48 (oszlopok) és régiók (vonalak). 6 éves időszakot használunk, mivel ez egyenletesen osztja el a 126 éves rekordot. Az eredmények robusztusak a 2 és 11 nap közötti időszakok használatára. USA 48: összefüggő amerikai államok. A régióneveket lásd a 6.3.2. ábrán. Forrás: Az USHCN adatainak szerzői elemzése.

Az elmúlt 126 évben az átlagos CONUS állomás 6 éves időszakonként 129 olyan napot tapasztalt, amikor a hőmérséklet meghaladta a 95°F-ot, de a regionális értékek 278-tól (Déli-síkság) 9-ig (Északkelet) terjednek. Ezért az ilyen küszöbérték-elemzéseket óvatosan kell értelmezni. A 6.3.5. ábra azt mutatja, hogy a kilenc régió közül csak háromban (mind a nyugati oldalon) tapasztaltak növekvő tendenciát a 95°F-os vagy annál melegebb napok számában (szaggatott vonalak). A CONUS egészében nem, a másik hat régióban pedig csökkenés tapasztalható.

Az NCA5 idézetben említett 2021-es csendes-óceáni északnyugati hőhullámot a 8.6.1. szakaszban részletesebben is megvizsgáljuk. A bizonyítékok arra utalnak, hogy ez egyetlen, példa nélküli esemény volt a feljegyzésekben, és nem része a fokozódó szélsőséges hőség mintázatának. Például az 5 napos átlagos troposzférikus rácspont-hőmérsékleti anomália a csendes-óceáni északnyugati régióban az esemény során +10,8 °F volt, ami az északi félteke legszélsőségesebb rácspont-nyári anomáliája az elmúlt 46 évben, több mint 4 millió rácsérték alapján. Ezzel szemben a globális hőmérsékleti anomália ebben az időszakban gyakorlatilag nulla volt (+0,03 °F, Mass et al. 2024).

6.3.3 Hőhullámok

A hőhullámoknak (egymást követő napoknak, amelyek meghaladják az extrém küszöbértéket) nagyobb társadalmi hatásuk van, mint egyetlen napi rekordhőmérsékletnek. A „hőhullám napokat" itt úgy mérjük, mint az összes olyan nap számát május-szeptemberben, amelyek meghaladják az adott nap 90. percentilisét, és amelyek legalább hat egymást követő napos időszakon belül esnek. Ez egyenértékű az NCA4-ben használt módszerrel, azzal a különbséggel, hogy a referencia-időszak itt a teljes 1899-2024 közötti idősor, míg az NCA4 a referencia-időszakot a hűvösebb 1961-1990 közötti időszakra csonkolta. (Az alább látható eredmények mintázata nem függ a referencia-időszak megválasztásától.) Ez a csonkolás növeli a pozitív eredményeket (a 90. percentilist meghaladó napok) a referencia-időszaknál melegebb években, különösen 1960-tól kezdődően és a jelenig terjedően (lásd a 6.3.6. ábrát és az alábbi tárgyalást).

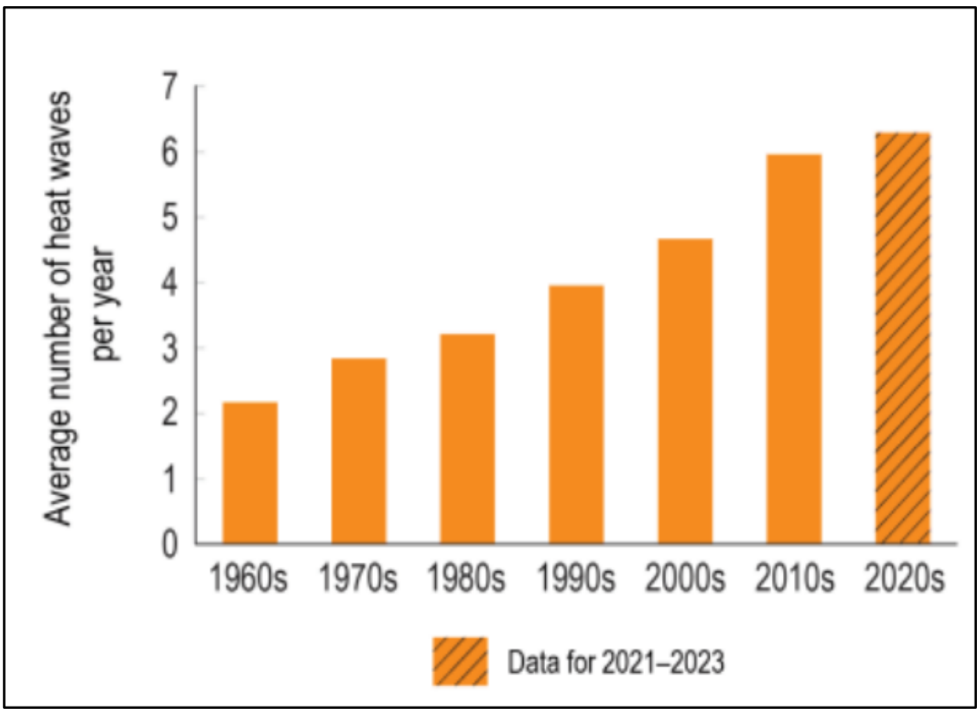


6.3.6. ábra: A hőhullámos napok számának 15 éves átlaga állomásonként a CONUS-ban (fekete vonal) és két régióban: Nyugat (piros), Közép-Kelet (zöld).

A 6.3.6. ábra azt jelzi, hogy a hőhullám-aktivitásban regionális eltérések vannak. A 20. század első felének túlzott hősége elsősorban az ország keleti kétharmadában jelentkezett, míg a közelmúltban a hőhullámos napok számának növekedése Nyugaton tapasztalható (NCA5). Ez azt jelzi, hogy a háttér meleg évszaki cirkulációja a 20. század első felében a keleti országrészekben kedvezett a hőhullámoknak. de a 21. században a mintázatok a nyugati részeken kedveztek a hőhullámoknak. A CONUS egészére nézve a hőhullámok ma sem gyakoribbak, mint egy évszázaddal ezelőtt, ami összhangban van az NCA4-ből vett 6.4.1. ábra felső paneljével.

Ez a mutató régiónként jelentősen eltérő. A négy északi régió (Csendes-óceáni ÉNY, Északi-síkság, Felső-Középnyugat és Északkelet) átlagosan 15-27 hőhullámos napot tapasztal 15 éves időszakonként. Ezzel szemben az öt déli régió (Csendes-óceáni Délnyugat, 4-Corners, Déli-síkság, Ohio-völgy és Délkelet) 37-54 ilyen napot tapasztal, ami lényegében kétszer annyi. Ez arra utal, hogy a nyári cirkulációs mintázat a déli régiókban hajlamosabb az állandó eseményekre, míg az északi régiókban az átmeneti rendszerek gyakoribbak, és így lerövidítik ezeket a potenciálisan hosszabb eseményeket.

A hőhullámok elemzése jó példa arra, hogy miért fontos a teljes adatkészletek és a megfelelő mérőszámok figyelembevétele. Az NCA5 a https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves (USGCRP 2023) weboldalra irányítja az olvasókat, ahol megtekinthetik a városi hőhullámok évtizedenkénti számát az 1960-as évektől kezdve. Ezt a 6.3.7. ábrán mutatjuk be.



6.3.7. ábra: A városi hőhullámok átlagos száma évente 50 nagy amerikai nagyvárosi területen, de a szövegben kifejtett okok miatt ez egy félrevezető mutató. Forrás: https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves (hozzáférés: 2025. május 22.).

Az ábra évtizedenként monoton növekedést mutat, az 1960-as években évente két előfordulás volt, a 2020-as években hat. A hőhullám használt definíciója az emberi kellemetlenségek szokatlan, de gyakorlatias mérőszáma – legalább két egymást követő napból álló időszak, amikor a *minimális* látszólagos hőmérséklet (a hőmérséklet és a páratartalom kombinációja) meghaladja a 85. percentilist. Azt is meg kell jegyezni, hogy az adathalmaz az 50 legnagyobb amerikai városra korlátozódik.

A szokatlan hőhullám-definíció és a városi fókusz miatt az USGCRP (2023) által bemutatott, 1960 óta növekvő értékek a hosszú távú trendeket és az üvegházgáz-kibocsátás hatását illetően legalább két okból nem informatívak. Először is, ahogy a 6.3.1. és 6.3.6. ábrán látható, az 1960-as volt a leghidegebb évtized, az 1970-es pedig a második leghidegebb évtized az 1910-es évek óta, így ez a kezdő dátum az idősorban kedvez a növekedés kimutatásának. Másodszor, az 1960 utáni urbanizáció ezekben a városokban jelentős tényező a Tmin emelkedésében az állandósult Tmax-hoz és a közeli vidéki állomások Tmin-jéhez képest (Karl et al. 1988, Runnals és Oke 2006, Christy et al. 2009, McNider et al. 2012). Ez nem zárja ki az éjszakai hőmérsékletek valódi emelkedését az Egyesült Államok nagyobb városaiban, és az ezekkel a változásokkal járó társadalmi hatásokat. Megjegyezzük azonban, hogy számos okból kifolyólag a nyári Tmax (különösen a vidéki területeken) jobb mérőszám a háttérklíma változásai által befolyásolt hőhullámok változásainak kimutatására, mint például az, ami a növekvő üvegházhatású gázkoncentráció miatt következik be (Christy et al. 2009). A CONUS egészére vonatkozóan az ebben a szakaszban található bizonyítékok arra utalnak, hogy az üvegházgáz-kibocsátás az urbanizáció és a természetes éghajlati változékonyság hátterében csekély vagy semmilyen hatással nem volt a hőhullámokra. Függetlenül a regionális trendek végső okától, a hőhullámoknak fontos társadalmi hatásaik vannak, amelyekkel foglalkozni kell, amint azt a 10. fejezetben tárgyaljuk.

TUDÁSDOBOZ: A rövid adatsorok veszélyei

San Francisco jó esettanulmányt nyújt a rövid történelmi minták használatának korlátairól a szélsőséges események természetes változékonyságának jellemzésére. Tegyük fel, hogy San Francisco napi csapadékmennyiségéből az 1895 és 2024 közötti 130 éves mintát használjuk, és 3, 5, 14 és 30 napos csapadékrekordokat keresünk. Az eredményeket a 6.2. táblázat mutatja.

Event	Record (inches)	Year
3-day	6.94	2023
5-day	8.55	2023
14-day	12.62	2023
30-day	18.93	1998

6.2. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1895-2024

A rekordok mind a közelmúltbeli évekre összpontosulnak. 2023 kivételes évnek tűnik, és mivel a minta vége felé közeledik, arra utalhat, hogy az éghajlat veszélyesebb állapotba került, talán emberi hatások miatt. [A „2023" megjegyzés azt jelzi, hogy az esemény a 2022 augusztusa és 2023 júliusa közötti vízévben történt.]

De teljesen más képet kapunk, ha egy 45 évvel korábban, 1850-ben kezdődő adatsort használunk. A 6.3. táblázat azt mutatja, hogy a rekorddöntő események mind az 1860-as években történtek. Továbbá 2023 már nem is a 2. helyen áll, hanem a 3. vagy 4. helyre csúszik vissza. A két diagram adatainak összehasonlítása azt mutatja, hogy az 1862-es és 1867-es szélsőséges csapadékesemények lényegesen több csapadékot tartalmaztak, mint az 1998-as és 2023-as események, a 14 és 30 napos összesített értékek pedig körülbelül 50 százalékkal magasabbak voltak.

Event	Record (inches)	Year	Rank of 130-yr extreme listed in Table 6.2
3-day	8.85	1867	3
5-day	9.80	1867	3
14-day	19.05	1862	4
30-day	28.25	1862	2

Table 6.3: Extreme rainfall records, San Francisco, 1850-2024.

6.3. táblázat: Szélsőséges csapadékmennyiségek, San Francisco, 1850-2024.

A természetes változékonyság mértéke még jobban megmutatkozik, ha a paleoklíma-bizonyítékokat is megvizsgáljuk. Porter et al. (2011) felfedezték, hogy a legutóbbi 1800 évben legalább hat megavihar volt intenzívebb, mint a régiót sújtó, pusztító erejű 1861-62-es ARkStorm. Nyilvánvaló, hogy az ilyen szélsőséges események, amelyekre az 1895-2024-es idősorunkban „példátlan" volt, körülbelül 300 évente sújtják a régiót, bár 1895 óta nem történt ilyen.

E példa a viszonylag rövid éghajlati időszakok (~130 év) használatának korlátait szemlélteti az általános természetes változékonyság, és különösen a szélsőséges események jellegének és mértékének felmérésében. A természetes változékonyság teljes tartományának pontos ábrázolása minden attribúciós elemzésben elkerülhetetlen (8.6. szakasz). Az infrastruktúra-tervezők, a katasztrófavédelmi intézmények és az attribúciós kutatók akkor értenék meg egy jövőbeli szélsőség nagyságának jelentős téves jellemzését, ha csak az elmúlt 130 év megfigyeléseire alapoznának. Ebben az esetben egyetlen 130 éves időmintavétel akár 50 százalékkal is alábecsüli azt a szélsőséges értéket, ami mindössze 45 évnyi megfigyelés hozzáadásával határozható meg. Az ezreréves léptékű paleoklíma bizonyítékokhoz képest még nagyobb alulbecslés történne. Fontos tanulság, hogy az éghajlat önmagában is okozhat nagy meglepetéseket, még emberi befolyás nélkül is.

6.4 Szélsőséges csapadék

Az AR6 értékelése szerint az 1950-es évektől kezdődő adatokban a heves csapadékmennyiség növekedését figyelték meg.

> AR6: Az 1950-es évek óta **a heves csapadékesemények gyakorisága és intenzitása nőtt** a legtöbb olyan szárazföldi területen, amelyről a megfigyelési adatok elegendőek a trendelemzéshez (nagy megbízhatóság). (SPM A3.2)
>
> AR6: Észak-Amerikában szilárd bizonyítékok vannak arra vonatkozóan, hogy a szélsőséges **csapadékmennyiség nagysága és intenzitása *nagy valószínűséggel* nőtt** az 1950-es évek óta. Mind az [egynapos maximumok], mind az [5 napos maximumok] jelentősen megnőttek Észak-Amerikában 1950 és 2018 között. (11. fejezet, 1560. o.)

Az Egyesült Államok nemzeti éghajlat-értékelései (NCA4, NCA5) kiemelték a leghevesebb (különféle módokon definiált) csapadékesemények előfordulásának növekedését, elsősorban a CONUS keleti felében, különösen az északkeleti részén, akár 1901-ben, akár 1958-ban kezdődik az elemzés. Érdekes módon a regionális eltérések azt mutatják, hogy a szélsőséges csapadékesemények legnagyobb növekedése északkeleten, a legkisebb pedig nyugaton figyelhető meg, ami ellentétes a hőmérsékleti szélsőségek változásaival (6.3.6. ábra).

McKitrick és Christy (2019) hosszú távú és következetes állomási megfigyeléseket végeztek a szélsőséges napi csapadékmennyiségről, hogy teszteljék az NCA állításainak egy részét a délkeleti és nyugati partra vonatkozóan egy olyan trendmodell segítségével, amely nem paraméteres varianciabecslést tartalmazott, és ami robusztus a csapadékadatok komplex autokorrelációs tulajdonságaival szemben. Amikor az idősorokat visszafelé kiterjesztették (egyes esetekben akár 1872-ig), vagy később (1978) kezdték, egyik régióra sem kaptak szignifikáns trendet.

Ezen eredményeket ehhez a jelentéshez (McKitrick és Christy 2025) hasonlóan felépített megfigyelésekkel frissítettük: 29 állomással a CONUS csendes-óceáni partvidékén (1893, San Diegótól (Kalifornia) Blaine-ig (Washington)) és 24 állomással a párás délkeleten (1872, Austintól (Texas) Washington DC-ig). Továbbá az északkeleti területet 27 állomással bővítettük (1888, Buffalotól (New York) Eastportig (Maine). A helyszíneket a 6.4.1. ábra mutatja. Az állomásokat a hosszú távú, kiváló minőségű adatok elérhetősége alapján választottuk ki. A régiók mindegyike mutatja a szélsőséges csapadékviselkedés fontos jellemzőit: a csendes-óceáni partvidék a partra érkező légköri folyókkal van összefüggésben, amelyek esetében az AR6 1948 óta növekvő aktivitásról szolgáltat bizonyítékokat, és azt állítja, hogy a világ melegedésével további növekedés várható (AR6 8.3.2.8.2); az NCA jelentése szerint az északkeleten tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb mértékű növekedését. Az NCA-k a délkeleti területet is megemlítették, mint a szélsőséges események megnövekedésével jellemzett területet. McKitrick és Christy (2019) elemzését alkalmaziva a régiónkénti eredmények (és azok magyarázatai) a következők voltak.

Heves esőzések a Csendes-óceáni parton

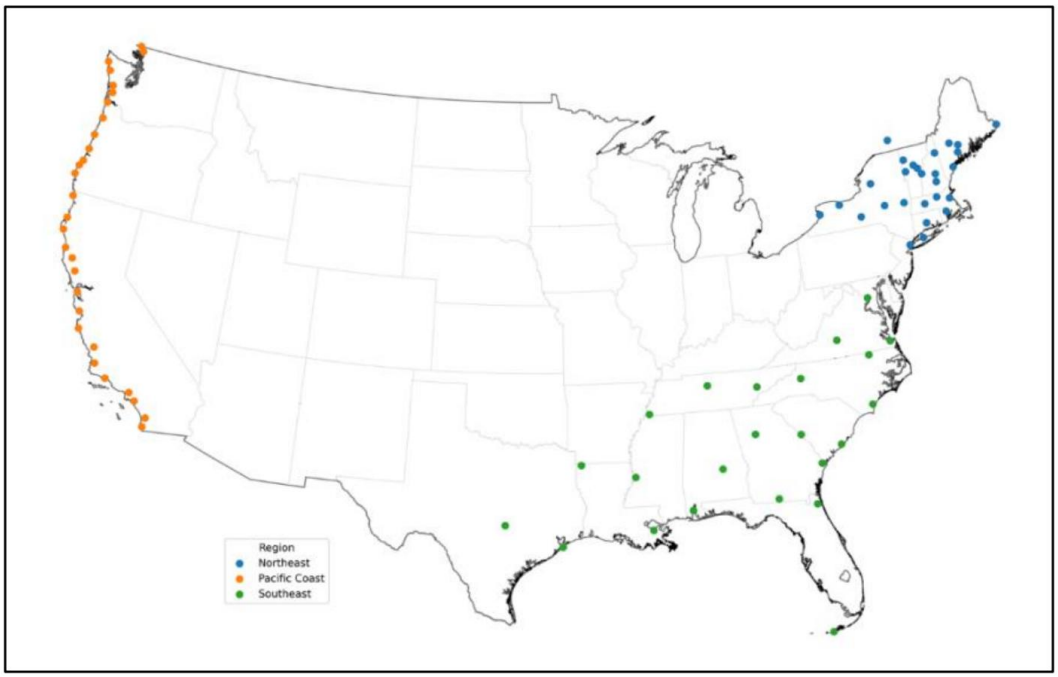
• Az átlagos csapadékmennyiség trendje statisztikailag szignifikáns (csökkenő) Astoris-ban, (Oregonban); máshol nem szignifikáns.

• A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és szignifikáns Big Sur-ben (Kaliforniában); máshol nem szignifikáns.

• A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Aberdeen-ben (Washington államban) és Big Surben (Kaliforniában), valamint negatív és szignifikáns az Oregonbeli Newport-ban (máshol nem szignifikáns).

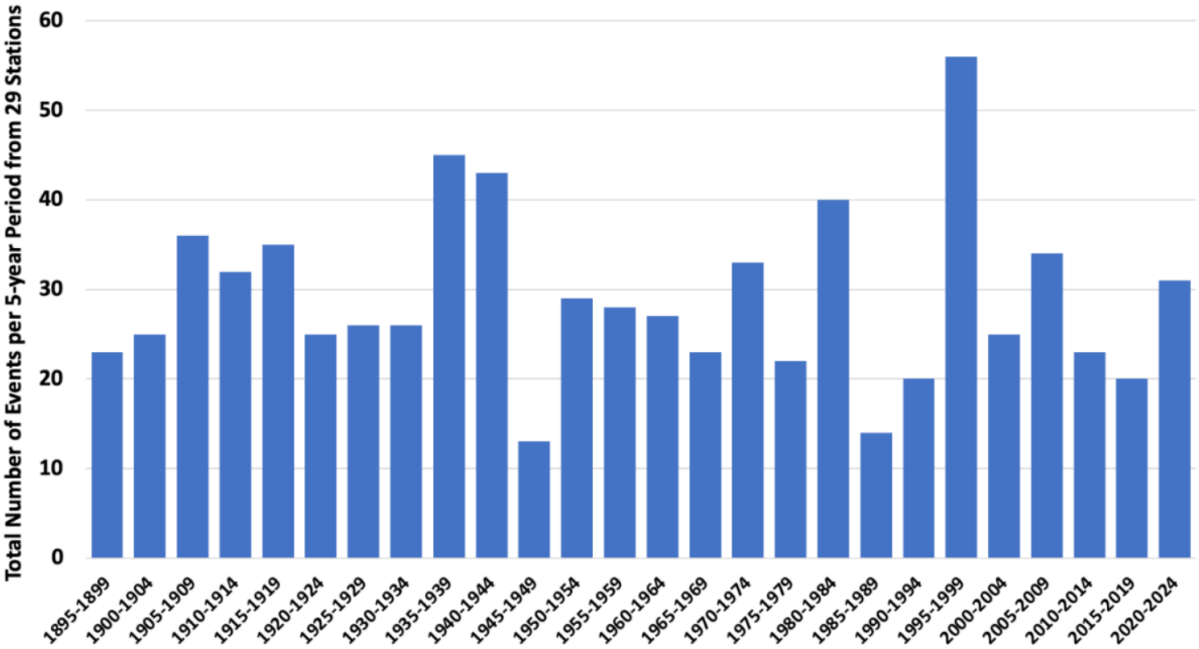
• A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

A Csendes-óceáni partvidék jelentős mennyiségű csapadékot kap a légköri folyók (AR) eseményeiből, amelyek gyakran tartanak egy-két napnál tovább (pl. Gershunov et al. 2017, Pan et al. 2024). A közelmúlt történelmének legrosszabb ilyen eseménysorozata az úgynevezett ARkStorm volt, amely 1861 decemberében és 1862 januárjában történt; Kalifornia egyes részeire közel 3 méternyi esőt zúdított, és a teljes Central Valley-t hetekre helyenként 4,5 méternyi vízzel borította (Brewer 1930, Null és Hulbert 2007). Ezenkívül paleoklíma-kutatók Kaliforniában a legutóbbi 1800 évben hat, az 1861–1862-esnél hevesebb megavihart találtak, körülbelül 300 éves időközönként (Porter et al. 2011).

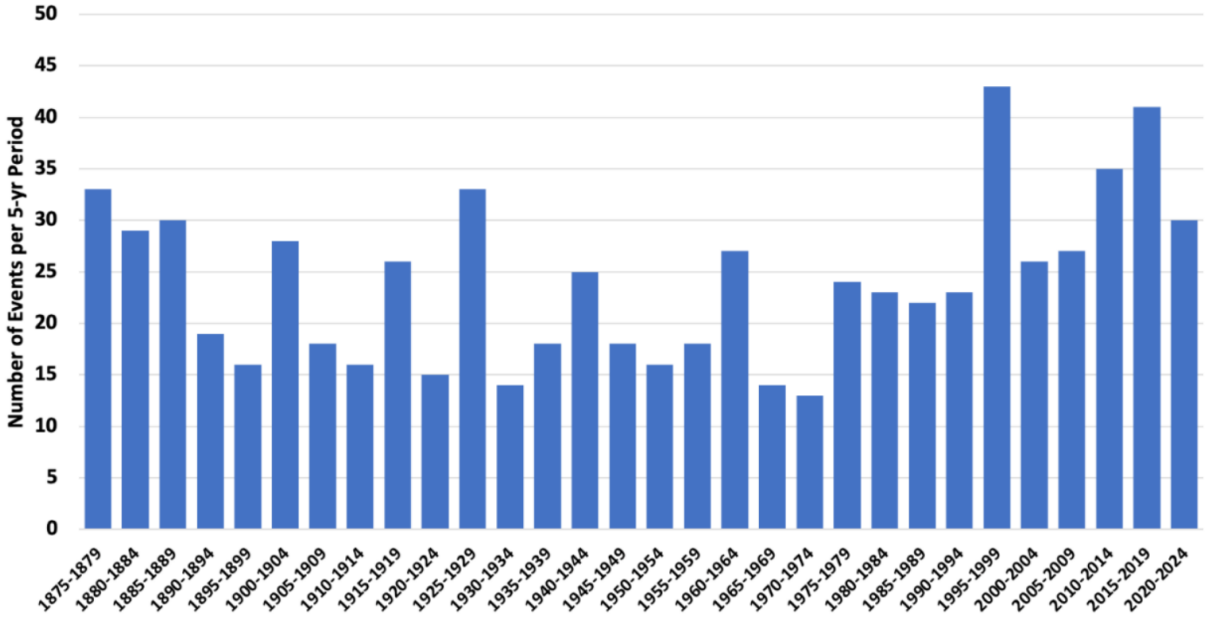


6.4.1. ábra: A jelentésben használt csapadékmérő állomások helyszínei. Narancssárga: Csendes-óceáni partvidék. Kék: Északkelet. Zöld: Délkelet. Adatok: McKitrick és Christy (2025).

Az 5 napos özönvizek előfordulását a következőképpen vizsgáljuk meg. A csendes-óceáni partvidéket példaként véve, egy 130 éves időszak 5 éves intervallumokból 26-ot tartalmaz. Minden helyszínre kiszámítottuk az év 5 napos csapadékösszegét, és kiválasztottuk a mintában a 26 legmagasabb értéket. Egyetlen évben a 26 leghevesebb közül több is előfordulhat. Ezek mindegyike 5 évente 1-szer előforduló eseménynek tekinthető. Ha nincsenek trendek a csapadékmennyiségben, akkor ezeknek az eseményeknek az összes állomáson egyenletesen kell eloszlania az évek során. A 6.4.2. ábrán ezen események időbeli eloszlását mutatjuk be a csendes-óceáni parton. Jól láthatóak az 1997-98-as nagyszabású El Niño eseményhez kapcsolódó özönvizek. Bár szeszélyesek, ahogy az az ilyen csapadékmennyiség-mérőszámokra jellemző, nincs arra utaló jel, hogy idővel gyakoribbá válnának.



6.4.2. ábra: A 26 legsúlyosabb (5 évenként 1) előfordulás időbeli eloszlása 5 éves időszakokra a csendes-óceáni parton található 29 állomáson.



6.4.3. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a legsúlyosabb 30 (5 évenként 1) eseményre vonatkozóan 24 állomáson a párás délkeleti régióban, Austintól Washington DC-ig, 5 éves időszakokra bontva, 1875-2024 között.

Délkeleti heves esőzések

• Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama) és Quitman-ben (Georgia), de másutt nem szignifikáns.

• A csapadékmennyiség változásának trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns Mobile-ban (Alabama), de másutt nem szignifikáns.

• A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Vicksburg-ban (Mississippi) és Norfolk-ban (Virginia), de másutt nem szignifikáns.

• A régió összes állomásának átlagában e három trendparaméter egyike sem mondható statisztikailag szignifikánsnak.

A 6.4.3. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 150 évre vonatkozóan a délkeleti párás zónában. Az 5 évente 1 alkalommal előforduló heves esőzések 5 napos összesítéseinek időbeli mintázata általában nem figyelemre méltó, bár 1995 és 2019 között magasabb értékek csoportja jelenik meg. Az ezekben az években tapasztalt növekedés nagyrészt a 4 legészakkeletibb állomásnak köszönhető: Wilmington NC, Weldon NC, Washington DC és Norfolk VA. Ez megerősíti az NCA4 és NCA5 által jelzett mintázatot – a heves esőzések gyakoriságának növekedését a trópusi viharok keleti (Észak-Karolinától Maine-ig tartó) időbeli csoportosulása miatt, amelyet alább tárgyalunk. Egyébként a fennmaradó 20 állomás a heves esőzések időbeli eloszlása szempontjából nem figyelemre méltó.

Északkeleti heves esőzések

• Az átlagos csapadékmennyiség trendje pozitív és statisztikailag szignifikáns a 27 helyszínből 12-ben, valamint a regionális átlagban is.

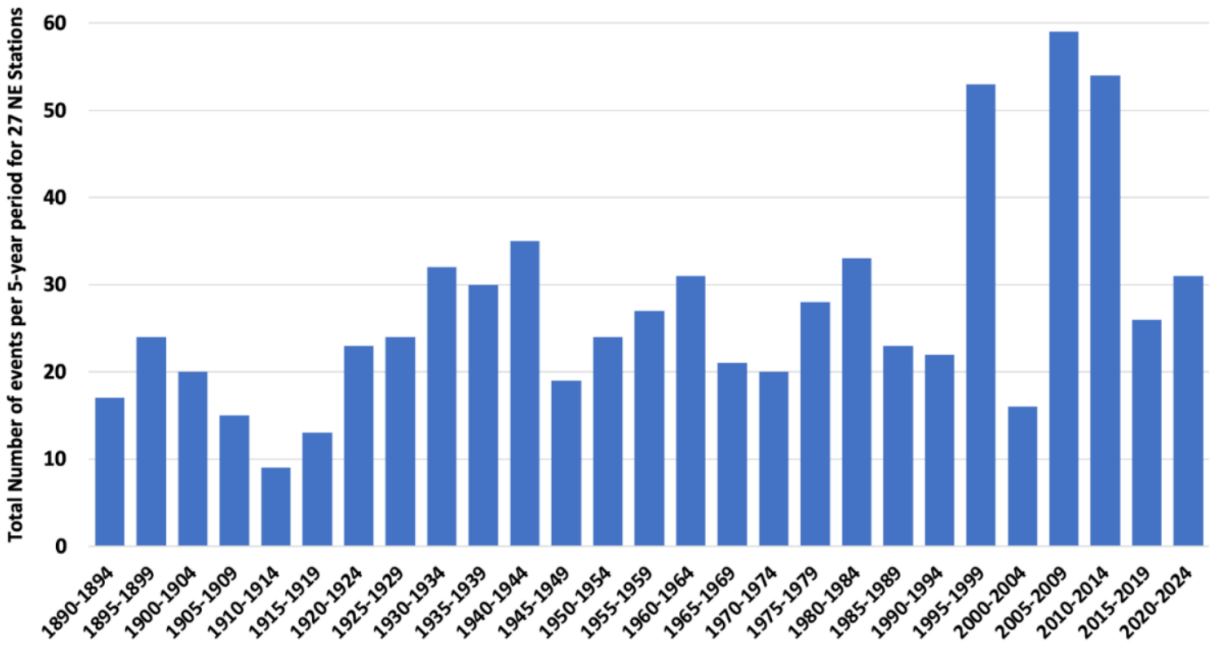
• A csapadékmennyiség ingadozásának trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Albany NY, Buffalo NY és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.

• A napi maximális csapadékmennyiség trendje pozitív és szignifikáns Portland ME, Gardiner ME és Eastport ME városában, de máshol nem szignifikáns.

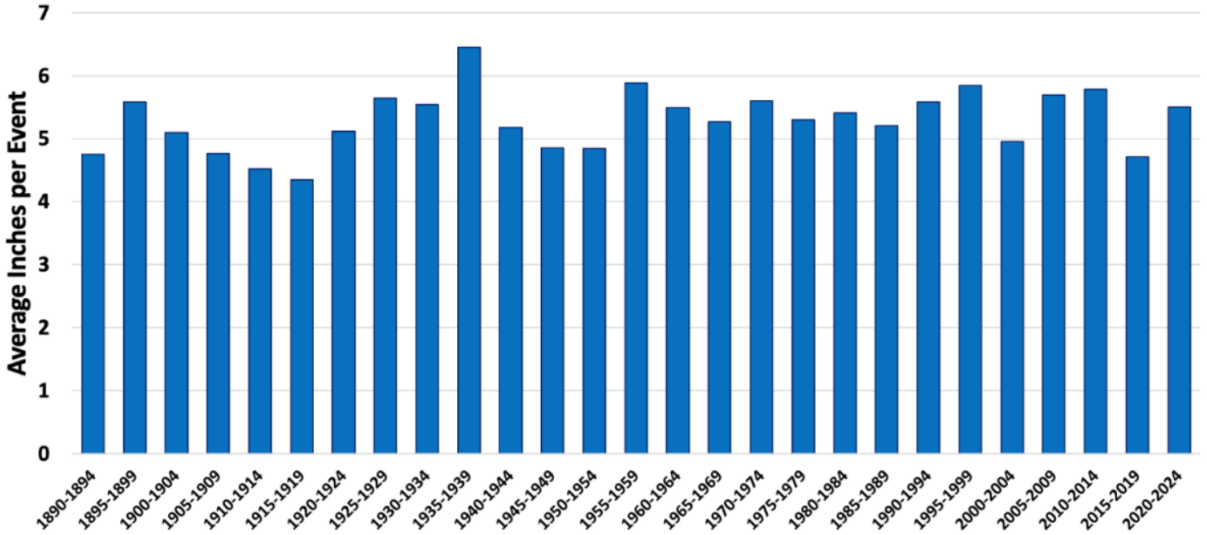
• A régió összes állomására átlagolva sem a csapadékmennyiség ingadozásában, sem a maximum csapadékmennyiségben nincs statisztikailag szignifikáns trend.

A 6.4.4. ábra analóg a 6.4.2. ábrával az elmúlt 135 évben az északkeleti 27 állomáson (beleértve Montrealt is Kanadában). Itt 3 napos összesítéseket használunk, mivel ez eredményezte a legnagyobb időbeli eltéréseket. Ebben a régióban az események 77 százaléka júniustól októberig következik be, és hurrikánok, trópusi viharok vagy extratrópusi rendszerekbe átmenő trópusi viharok betörései dominálnak bennük. Az NCA4 és NCA5 szerint ebben a régióban tapasztalták a szélsőséges események legnagyobb növekedését, ezért ezt érdemes közelebbről megvizsgálni.

Észrevehető a szélsőséges események egyfajta csoportosulása 1995 és 2014 között. Howarth et al. (2019) egy hasonló régiót vizsgáltak, mint ami a 6.4.4. ábrán szerepel. Magában foglalja Pennsylvaniát és New Jersey-t, és jelentős különbségekről számoltak be a különböző csapadékszélsőségekben két 18 éves időszak (1979-96, 1997-2014) között. A 6 hüvelyknél nagyobb 24 órás események 317 százalékos növekedését mutatták ki. Mi ugyanezen évekhez képes58 százalékos növekedést tapasztaltunk. A 6.4.4. ábra azonban azt mutatja, hogy a gyakoriság 2014 után meredeken csökken, és a következő 5 éves intervallumokban visszatér a hosszú távú átlaghoz, ami ismét illusztrálja a rövid távú trendekből levont következtetések veszélyeit, amikor nagy változások vannak.



6.4.4. ábra: Mint a 6.4.2. ábrán, de a leghevesebb 27 (5 évente 1 alkalommal előforduló) 3 napos csapadékeseményre vonatkozóan 27 északkeleti állomáson New Yorktól ME-ig, beleértve Montrealt is.



6.4.5. ábra: Az 5 évente 1 alkalommal előforduló események során hulló átlagos csapadékmennyiség az északkeleti állomásokon.

A Howarth et al. mintájában tapasztalt magas százalékos növekedés viszonylag kevés helyszínen kis számokkal jár együtt: 58 állomáson az első időszakban mindössze 6, a másodikban pedig 25 eset történt. A legtöbb állomás nem regisztrált ilyen eseményt. Ha régiószerte növekedés tapasztalható a heves eseményekben, akkor annak az összes állomás átlagában látszania kell. A 6.4.5. ábra az ÉK-i 1:5 évente előforduló események átlagos csapadékmennyiségét mutatja. A tendencia mindössze +0,04 hüvelyk/évtized. A legmagasabb mennyiség, 1935-39, magában foglalja az 1938-as Nagy Új-Angliai Hurrikánt, amely egyike volt a régiót sújtó ritka jelentős (3-as vagy magasabb kategóriájú) hurrikánoknak. A 6.4.4. és 6.4.5. ábrákon látható eredmények tehát arra utalnak, hogy

bár az 1995 és 2014 közötti időszakban néhány helyszínen megugrott az események száma, a minta, nem volt regionális, és a változás 2014 után nem maradt fenn.

Jong et al. (2024) az északkeleti régió csapadékeseményeiben 1959 óta a trópusi hatások növekedését dokumentálja, és arra a következtetésre jutott, hogy „az őszi szélsőséges csapadéktrend az USA északkeleti részén az 1990-es évek óta elsősorban a trópusi ciklonokhoz kapcsolódó eseményeknek tulajdonítható." A kérdés tehát a következő: „A trópusi rendszer 1997 és 2014 közötti, az északkeleti régiót érintő időbeli csoportosulása az emelkedő üvegházgáz-koncentrációra adott válasz volt-e?" Jong et al. megvizsgálták a CMIP-6 modell eredményeit, amelyek azt sugallják, hogy a 21. században kevesebb ilyen rendszer lesz, de a csapadékesemények intenzitása növekedhet. Ez a feltételezés nem látható a 6.4.5. ábrán, ahol a 135 éves időszak alatt az eseményenkénti mennyiség állandó maradt.

Vannak bizonyítékok arra, hogy a leghevesebb csapadékesemények újraeloszolhatnak a városi infrastruktúra helyi időjárásra gyakorolt hatása miatt (pl. Pielke Sr. et al. 2011, Zhang et al. 2018, Yang et al. 2024). Yang et al. kijelentik: „A kompakt beépítésű városokban a belvároshoz képest nagyobb mértékű a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés tapasztalható, mint a vidéki környezetben, míg a szétszórt beépítésű városokban a szélsőséges csapadékmennyiség-növekedés csökken." Bár ez egy fontos szempont, az ebben az elemzésben használt konkrét állomásokra gyakorolt hatás ismeretlen, vagy legalábbis nem mutatható ki a 6.4.5. ábrán.

Összefoglalva, egyes amerikai régiókban rövid ideig tartó növekedés tapasztalható a szélsőséges csapadékeseményekben, ami összhangban van a természetes változékonysággal. A hosszú távú, országos történelmi feljegyzések elemzése azonban, amely figyelembe veszi a csapadékadatok autokorrelációs tulajdonságait, nem támasztja alá azt az állítást, hogy a szélsőséges, rövid ideig tartó csapadékesemények gyakoribbak vagy intenzívebbek lennének.

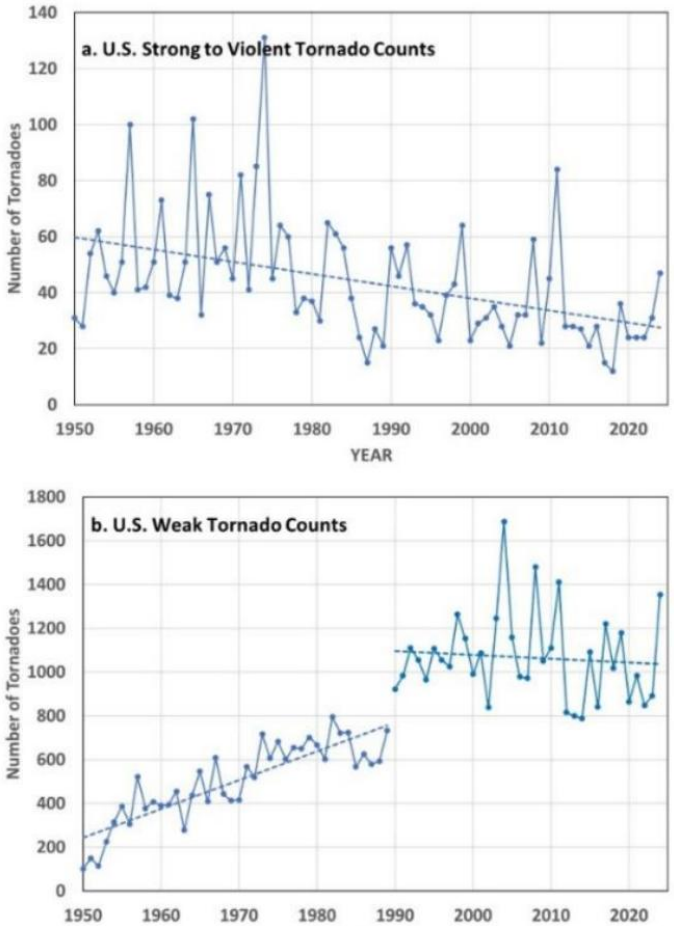
6.5 Tornádók

Az AR6 a következőképpen értékeli a tornádók trendjeit az Egyesült Államokban:

> [A] súlyos konvektív viharokhoz kapcsolódó tornádók, jégesők és villámlások megfigyelési trendjei nem észlelhető megbízhatóan a hosszú távú megfigyelések elégtelen lefedettsége miatt. *Közepes megbízhatóságú*, hogy az Egyesült Államokban a tornádók átlagos éves száma viszonylag állandó maradt. (11. fejezet, 11.7.3. szakasz, 1594. oldal)

A gyenge tornádók megfigyelése az idők folyamán megváltozott. A vidéki népesség növekedése és a kézi eszközökkel történő videofelvételkészítés növekvő lehetősége, ahhoz vezetett, hogy gyakrabban tettek jelentést minimális károkat okozó gyenge tornádókról. Ezzel szemben az erős és heves tornádók megfigyelése idővel következetesebb lett. Megjegyzendő, hogy a tornádó erősségét az általa okozott károk alapján mérik, nem pedig a tölcsér vizuális megjelenése alapján. A korábbi évtizedekben a korlátozott valós idejű megfigyelési képességek nem akadályozták meg az azonosítást, mivel az erős és heves tornádók sokkal nagyobb károkat okoznak, amelyeket később fognak felmérni, még akkor is, ha magát a tornádót nem figyelték meg. Amióta 1950-ben elkezdődött a statisztika, jelentősen (körülbelül 50%-kal) csökkent az erős és heves tornádók száma, amint azt a 6.5.1a. ábra is mutatja.

Összefoglalva, 1950 óta az Egyesült Államokban a súlyos tornádók száma észrevehetően csökkenő tendenciát mutat. 1990 után az Egyesült Államokban a gyenge tornádók száma nagyjából állandó maradt; az azt megelőző adatok hiányosak a megfigyelés korlátozottsága miatt.



6.5.1. ábra: Az Egyesült Államokban évente előforduló tornádók száma (a) erős és heves tornádók (EF3-tól EF5-ig) és (b) gyenge tornádók (EF0-tól EF2-ig) tekintetében. A NOAA Viharelőrejelző Központ adatai alapján, amelyek a https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv címen érhetők el.

6.6 Árvizek

Az árvizekben bekövetkezett változásokat a következőképpen értékelték:

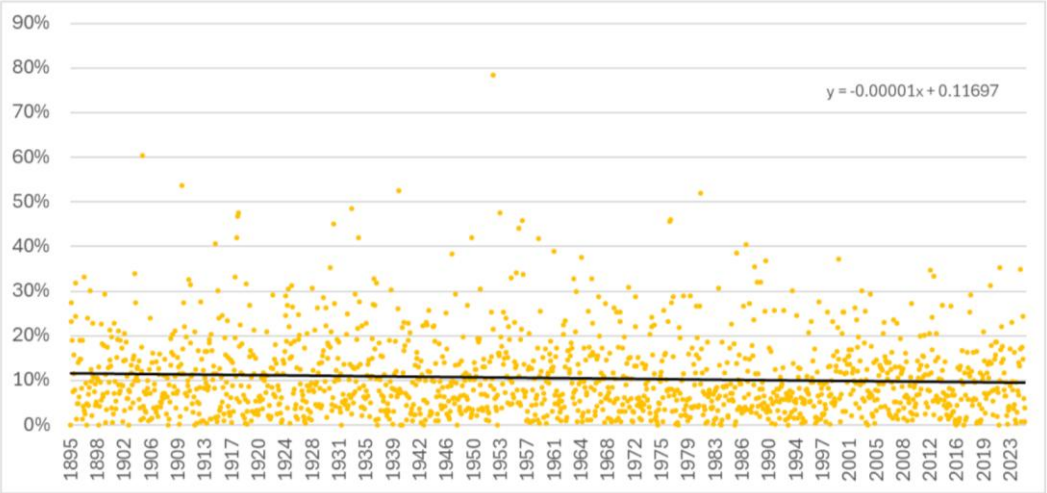
> AR6: Globális szinten megfigyelt változások tekintetében az árvizek nagyságrendjére vagy gyakoriságára az SREX *alacsony megbízhatósági s*zintet mért. Ezt az értékelést megerősítette az AR5 jelentés is. Az SR15 egyes régiókban az árvízgyakoriság-növekedést és szélsőséges vízhozamot talált, más régiókban viszont csökkenést. . . [A] megfigyelt árvízváltozásokról szóló hidrológiai szakirodalom heterogén, regionális és szubregionális medenceszintekre összpontosít, ami megnehezíti a globális, és néha regionális szintek szerinti szintézist. (11.5. fejezet)
>
> AR6: A hideg régiókban, ahol a felmelegedésre válaszul (nagy megbízhatósági szinten) a hóolvadás uralja az áramlási rendszert, az árvizek szezonalitása megváltozott. Az elmúlt évtizedek csúcsait elérő trendjeivel kapcsolatos megbízhatóság globális szinten *alacsony*. (11.5. fejezet)
>
> NCA4: Az extrém magas vízhozamértékek trendjei vegyesek az Egyesült Államokban. 200 amerikai vízfolyásmérő elemzése növekvő és csökkenő árvízi nagyságú területeket is mutat, de **nem szolgáltat szilárd bizonyítékot** arra vonatkozóan, hogy ezek a tendenciák emberi hatásoknak lennének tulajdoníthatók (240-241. o.)

Az árvizekben USA-szerte kimutatható trendek hiánya összhangban van a 6.4. szakaszban szereplő megállapítással, miszerint a szélsőséges csapadékmennyiségben nem mutatkozik koherens változás.

6.7 Szárazság

Az aszálytrendek értékelése a következő volt.

> AR6: Kevés AR6 régióban figyelték meg a meteorológiai aszály növekedését (11.9. szakasz, 1575. o.),
>
> AR6: A mezőgazdasági és ökológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg minden kontinensen (*közepes megbízhatóság*), de csak egy AR6 régióban csökkenést (*közepes megbízhatóság)*. A hidrológiai aszályok növekvő tendenciáit figyelték meg néhány AR6 régióban. (11. fejezet összefoglalása)
>
> NCA4: A megnövekedett csapadékmennyiség következtében a**z aszálystatisztika az egész CONUS-ban csökkent**. (233. o.)
>
> NCA4: A közelmúltbeli aszályok és a kapcsolódó hőhullámok rekordintenzitást értek el az Egyesült Államok egyes régióiban; földrajzi léptékét és időtartamát tekintve azonban az **1930-as évekbeli** porvihar-korszak történelmi feljegyzései **továbbra is referencia aszályának és szélsőséges hőség eseményének** számít (nagyon magas megbízhatóság). (231. o.)
>
> SREX: A paleoklíma szempontból a közelmúltbeli aszályok nem példa nélküliek, súlyos „megaszárazságokról" számoltak be a paleoklíma-feljegyzésekben Európából, Észak-Amerikából és Ausztráliából. (170. o.)



6.7.1. ábra: A „nagyon száraz" minősítés havi százalékos aránya az USA-ban, 1895–2025. Adatforrás: NOAA https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0 , amihez a legkisebb négyzetes trendvonal hozzá lett adva.

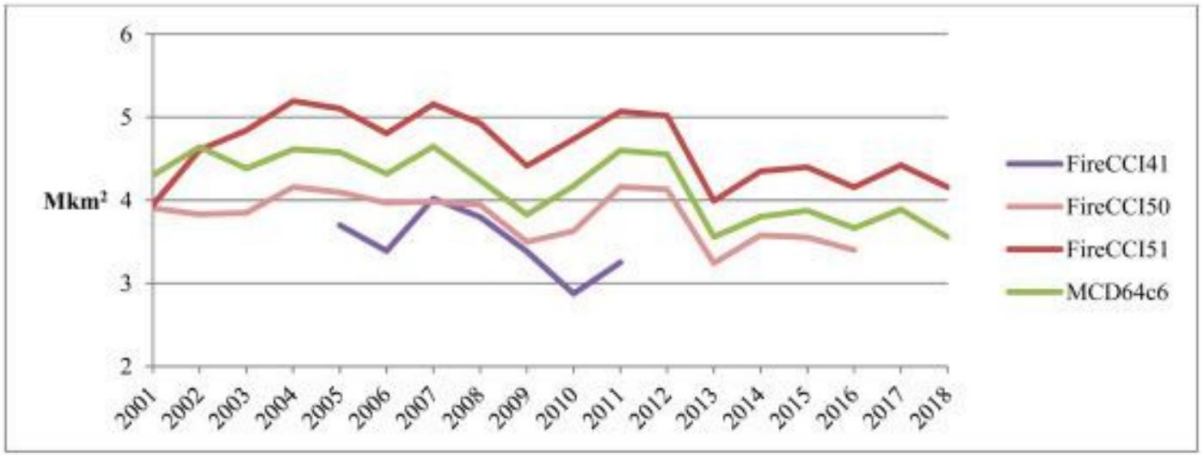
Amint a 6.7.1. ábrán látható, az Egyesült Államok hosszú távú adatai a szélsőséges szárazságban jelentéktelenül csökkenő tendenciát mutatnak (-0,001 százalék évente).

Kogan et al. (2020) egy 38 éves, nagy felbontású, műholdas aszálymérést vizsgált, és arra a következtetésre jut, hogy a globális aszály nem erősödött fel, és nem kapcsolódik az éghajlatváltozáshoz: „határozottan kijelenthető, hogy a globális és a főbb gabonatermelő országok aszályos területeinek és intenzitásának trendjei az 1980-as évek óta nem követik a globális éghajlati felmelegedést."

Összefoglalva, nincs bizonyíték arra, hogy az elmúlt évtizedekben az Egyesült Államokban vagy globálisan megnövekedett volna a meteorológiai aszályok gyakorisága vagy intenzitása.

6.8 Futótüzek

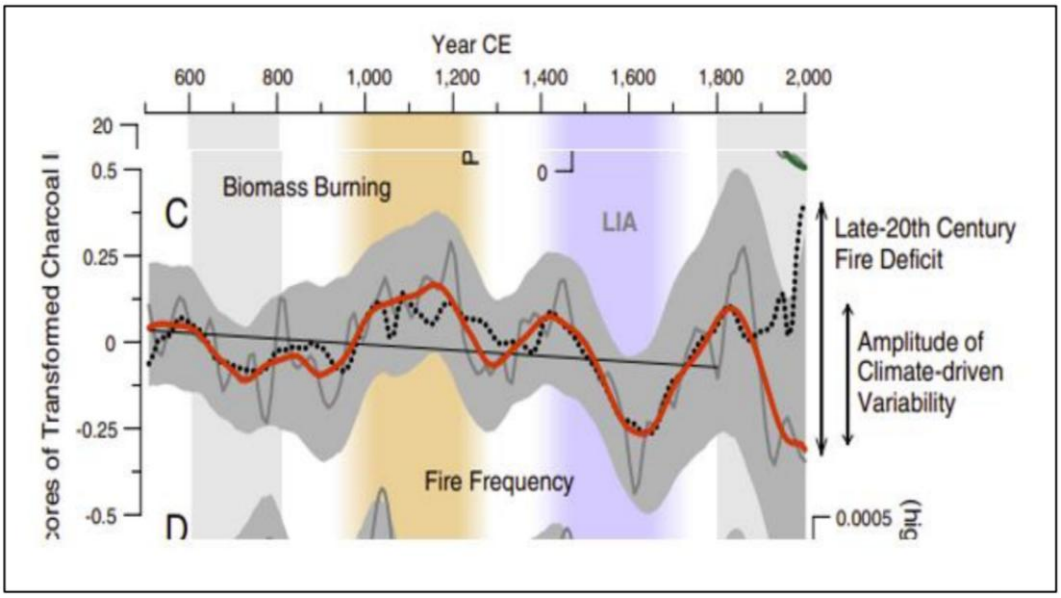
Az IPCC nem adott ki adatelemzést a futótüzek okairól. Amint a 6.8.1. ábra mutatja, az Európai Űrügynökség által mért globális futótűz-aktivitás a 21. században csökkenő tendenciát mutat.



6.8.1. ábra: Globális tűzvészek kiterjedése, 2001–2018. Forrás: Lizundia-Loiola et al. (2021) 12. ábrája alapján. A különféle színű vonalak különféle műholdakból és algoritmusokból származó adattermékeket jelölnek.

A globális adatok azt mutatják, hogy a futótűz-kiterjedtség minden kontinensen állandó vagy csökken (Samborska és Ritchie, 2024). Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy egyes régiókban a tűz-intenzitás rosszabbodik (Cunningham et al. 2024), és hogy a futótüzek 2001 és 2019 között a globális erdőborításban nettó csökkenést okoztak (Tyukavina et al. 2022).

Az Egyesült Államokban 1900-ban elkezdett aktív tűzoltási gyakorlat megnehezíti a futótűz-aktivitás természetes alapértékének meghatározását. A paleoklíma-bizonyítékok azt mutatják, hogy a múltbeli aktivitás sokkal magasabb volt, mint a mai. Marlon et al. (2012) üledékes faszénrétegeket használt az Egyesült Államok nyugati része tűztörténetének rekonstruálására az elmúlt 1400 évben, és modellt is illesztett a tűzaktivitás éghajlati viszonyok függvényében történő előrejelzésére. Eredményeiket az alábbi 6.8.2. ábra foglalja össze (a cikkük 2. ábrájából). A 20. században egyre nagyobb a futótüzek hiánya. Más szóval, bármennyi tüzet is figyeltek meg a 20. században, az kevesebb volt, mint amit az éghajlati viszonyok alapján az előző évszázadokban megfigyelhettek volna. Parks et al. (2025) hasonlót állapított meg: az észak-amerikai futótüzek égési területének közelmúltbeli növekedése ellenére a történelmi futótüzek gyakoriságához képest továbbra is jelentős futótűz-hiány áll fenn.

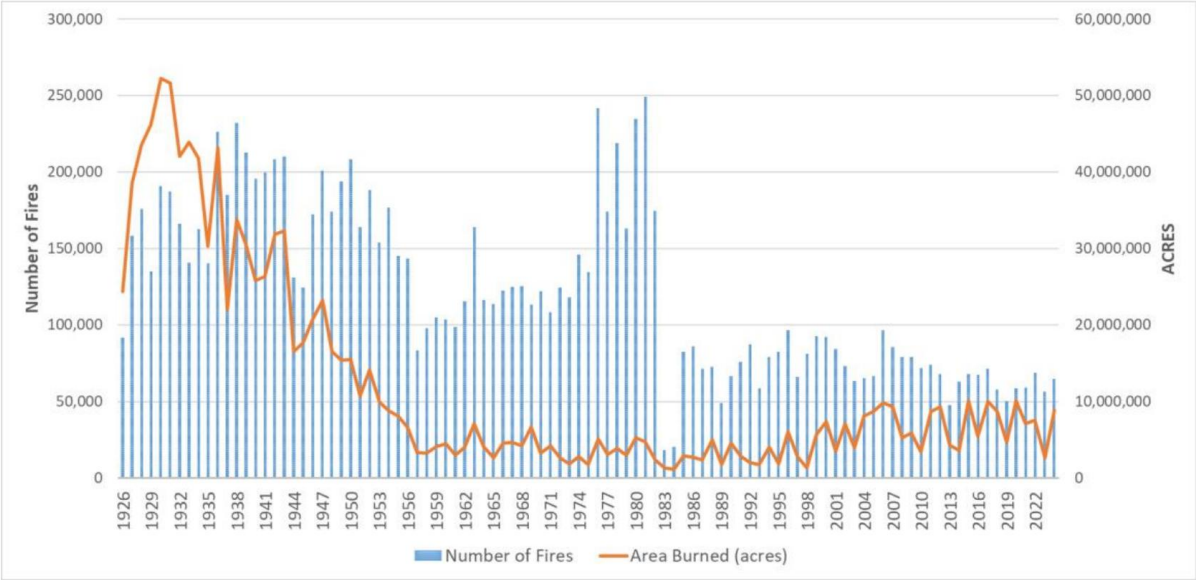


6.8.2. ábra: Tűzgyakoriság és tűzhiány az Egyesült Államokban. A piros vonal a simított faszénrekordot, a fekete szaggatott vonal pedig az éghajlati viszonyok alapján előrejelzett faszénrekordot mutatja. Forrás: Marlon et al. (2012) 2. ábra.

Az amerikai Nemzeti Ügynökségek Közötti Tűzoltóközpont (NIFC) 1926 és 2023 közötti adatait a 6.8.3. ábra mutatja. Az NIFC eltávolította az 1960 előtti adatokat jelenlegi weboldaláról, azzal az indokkal, hogy a mérési módszerek 1960 után megváltoztak, így az összehasonlítás megbízhatatlanná válik. Mindazonáltal, ha csak az 1985 utáni időszakra koncentrálunk, a tüzek száma nem növekszik. A leégett terület valóban nőtt, de csak körülbelül 2007-ig.

Az erdő- és bozóttüzek mindig is részét képezték a természetnek, és minden bizonnyal teremthetnek olyan körülményeket, amelyek rövid távon minden élőlény számára barátságtalanok, ide értve az embert is. A tudomány megerősítette a futótüzek általános előnyeit és szükségességét. Míg a közelmúltbeli nagy horderejű tüzek és évszakok emlékeztetnek a potenciális pusztító hatásra, a legnagyobb horderejű amerikai futótűz továbbra is az 1910-es ún. nagy robbanás az Egyesült Államok nyugati részén, ami több mint hárommillió hektárt pusztított el, és egész városokat semmisített meg, mint például Taft, MT (Apple, 2020). Az 1910-es tűzvész átalakította az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálatát (National Forest Foundation 2022), ami a tűzoltásra helyezte a hangsúlyt, elsődleges célként az összes erdő- és bozóttűz megfékezését tűzve ki (Forest History Society, 2022). Ez vezetett az 1935-ös „10 órás szabályhoz", amely előírta, hogy minden, bármely napon észlelt tüzet másnap reggel 10 óráig meg kell fékezni (National Forest Foundation, 2022).

Nemes célnak tűnik ugyan mindenféle futótűz elfojtása, felmerültek a kérdések, hogy ez a viselkedés vajon „követi-e a tudományt" (U.S. Forest Service, 2022). Idővel az Egyesült Államok Erdészeti Szolgálata elkezdte újragondolni céljait, felismerve, hogy az olyan új megközelítések, mint az előírt égetések, a tüzelőanyagok kiküszöbölése és az ellenőrzött erdőtüzek megfelelőbbek (Sommer, 2016). A legújabb kutatások igazolják ezt a megközelítést, és elismerik, hogy a gyakoribb kisebb tüzek valószínűleg egészségesebb erdőket, vízi ökoszisztémákat és biológiai sokféleséget eredményeznek (Stephens et al., 2021).



6.8.3. ábra: Az Egyesült Államokbeli erdő- és bozóttüzek száma 1926 és 2023 között. Forrás: 2018 utáni adatok: National InterAgency Fire Center adatok https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires. 2017 előtti adatok: webarchive.org (dátum nélkül)

Hivatkozások

Apple, C. (2020, January 21). 1910 fire – The big burn across Montana and Idaho. The Spokesman-Review. https://www.spokesman.com/stories/2020/jan/19/1910-fire-big-burn-across-montana-and-idaho/

Bell, Gerald D. and Muthuvel Chelliah, "Leading Tropical Modes Associated with Interannual and Multidecadal Fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity," Journal of Climate 19, no. 4 (February 15, 2006): 590–612, https://doi.org/10.1175/JCLI3659.1.

Brewer, W. H. (1930). Up and down California in 1860–1864: The journal of William H. Brewer. University of California Press.

Christy, J. R., Norris, W. B., and McNider, R. T. (2009). Surface temperature variations in East Africa and possible causes. Journal of Climate, 22(12), 3342–3356. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2726.1

Cohn, T. A. and Lins, H. F. (2005). Nature's style: Naturally trendy. Geophysical Research Letters, 32(23). https://doi.org/10.1029/2005GL024476

Colorado State University. (2025). Realtime tropical cyclone guidance. https://tropical.atmos.colostate.edu/Realtime/index.php

Cunningham, C.X., G.J. Williamson, and D. Bowman (2024) Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth. Nature Ecology and Evolution 8, 1420–1425. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2

Forest History Society (2022). The 1910 fires. https://foresthistory.org/research-explore/us-forest-service-history/policy-and-law/fire-u-s-forest-service/famous-fires/the-1910-fires/

Gershunov, A., and K. Guirguis (2012). California heat waves in the present and future. Geophysical Research Letters, 39(18). https://doi.org/10.1029/2012GL052979

Gershunov, A., T. Shulgina, F.M. Ralph, D.A. Lavers J.J. and Rutz (2017). Assessing the climate-scale variability of atmospheric rivers affecting western North America. Geophysical Research Letters, 44(15), 7900–7908. https://doi.org/10.1002/2017GL074175

Goldenberg, Stanley et al., "The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implications," Science 293, no. 5529 (July 20, 2001): 474–479, https://doi.org/10.1126/science.1060040.

Howarth, M. E., C.D. Thorncroft, and L.F. Bosart (2019). Changes in extreme precipitation in the Northeast United States: 1979–2014. Journal of Hydrometeorology, 20(4), 673–689. https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0155.1

Hurst, H. E. (1951). Long term storage capacities of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116, 776–808.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jong, B.-T., H. Murakami, T.L. Delworth and W.F. Cooke (2024). Contributions of tropical cyclones and atmospheric rivers to extreme precipitation trends over the Northeast US. Earth's Future, 12, e2023EF004370. https://doi.org/10.1029/2023EF004370

Karl, T.R., H.F. Diaz, and G. Kukla. (1988): Urbanization: Its detection and effect on the United States climate record. Journal of Climate, 1, 1099-1123 https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/1/11/1520-0442_1988_001_1099_uidaei_2_0_co_2.xml

Karl, T. R., C.N. Williams Jr., F.T. Quinlan, and T.A. Boden (1990). United States Historical Climatology Network (HCN) serial temperature and precipitation data (Publication No. 3404). Oak Ridge National Laboratory.

Klotzbach, Phil et al. (2018) Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks, Bulletin of the American Meteorological Society 99, no. 7 (July 2018): 1359–1376, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1.

Kogan, Feliz, Wei Guob and Wenze Yang (2020) "Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security" Geomatics, Natural Hazards and Risk Vol 11(1)

Koutsoyiannis, D. (2013) Hydrology and Change. Hydrological Sciences Journal 58(6) http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626

Lizundia-Loiola, J., et al. (2020) A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. Remote Sensing of the Environment 236, 111493, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493

Markonis, Y., and D. Koutsoyiannis (2016). Scale-dependence of persistence in precipitation records. Nature Climate Change, 6, 399–401. https://doi.org/10.1038/nclimate2894

Marlon, Jennifer, Patrick J Bartlein, Daniel G. Gavin et al. (2012) Long-term perspective on wildfires in the western USA Proceedings of the National Academy of Sciences February 14 2012 https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109

Maue, R. N. (2025). Climatlas: Tropical cyclones. https://climatlas.com/tropical/

Maue, R. N. (2011) Recent historically low tropical cyclone activity. Geophysical Research Letters 38, L14803, doi:10.1029/2011GL047711

McKitrick, R., and J.R. Christy (2019). Assessing changes in US regional precipitation on multiple time scales. Journal of Hydrology, 578, 124074. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124074

McKitrick, R. and J.R. Christy (2025), "Data and Code for CWG2025 Report", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/by76s7rxfb.1

McNider, R.T., G.J. Steeneveld, A.A.M. Holtslag, R.A. Pielke Sr., S. Mackaro, A. Pour-Biazar, J. Walters, U. Nair, and J.R. Christy, 2012: Response and sensitivity of the nocturnal boundary layer over land to added longwave radiative forcing. Journal of Geophysical Research., 117, D14106, doi:10.1029/2012JD017578.

Null, J. and J. Hulbert, "California Washed Away: The Great Flood of 1862," Weatherwise 60, no. 1 (2007): 26–30, https://doi.org/10.3200/wewi.60.1.26-30

National Forest Foundation. (2022). Blazing battles: The 1910 fire and its legacy. https://www.nationalforests.org/our-forests/your-national-forests-magazine/blazing-battles-the-1910-fire-and-its-legacy

National Interagency Fire Center. (2024). Wildfire statistics. https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires

NCA4. (2017). Climate science special report: Fourth National Climate Assessment, Volume I (D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, and K. A. Hibbard, Eds.). U.S. Global Change Research Program. https://doi.org/10.7930/J0J964J6
NCA5. (2023). Fifth National Climate Assessment (A. R. Crimmins et al., Eds.). U.S. Global Change Research Program. https://doi.org/10.7930/NCA5.2023.CH1 (accessed May 22, 2025)
NOAA Hurricane Research Division. (2025a). All U.S. hurricanes (1851–2019). https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html
NOAA Hurricane Research Division. (2025b). Most intense (3, 4, 5) continental United States hurricanes: 1851–1970, and 1983–2023. https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html
Overland, J. E. (2021). Causes of the record-breaking Pacific Northwest heatwave, late June 2021. Atmosphere, 12(11), 1434. https://doi.org/10.3390/atmos12111434
Pan, M., M. Lu and U. Lall (2024). Diversity of cross-Pacific atmospheric river main routes. Communications Earth and Environment, 5, 378. https://www.nature.com/articles/s43247-024-01552-y
Parks, Sean, Christopher Guiterman, Ellis Margolis et al. (2025) A fire deficit persists across diverse North American forests despite recent increases in area burned. Nature Communications 16 https://www.nature.com/articles/s41467-025-56333-8
Pielke, R. A., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2, 828–850. https://doi.org/10.1002/wcc.144
Porter, K., et al. (2011). Overview of the ARkStorm scenario. U.S. Geological Survey.
Quinlan, F. T., T. R. Karl, and C.N. Williams Jr. (1987). United States Historical Climatology Network (USHCN) serial temperature and precipitation data (NDP-019). Oak Ridge National Laboratory.
Runnalls, K.E. and T.R. Oke, 2006: Technique to detect microclimate inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. Journal of Climate, 19, 959-978. https://doi.org/10.1175/JCLI3663.1
Samborska, V., and H. Ritchie (2024). Wildfires. Our World in Data. https://ourworldindata.org/wildfires
Seneviratne, S. et al. (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013.
Sommer, L. (2016, November 7). Let it burn: The Forest Service wants to stop putting out some fires. KQED. https://www.kqed.org/science/1134217/let-it-burn-the-forest-service-wants-to-stop-putting-out-some-fires
Stephens, Scott et al., (2021) "Fire, Water, and Biodiversity in the Sierra Nevada: A Possible Triple Win," Environmental Research Communications 3, no. 8 (August 6, 2021): p. 081004, https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac17e2.
Tyukavina Alexandra , Peter Potapov, Matthew Hansen et al. (2022) Global Trends of Forest Loss Due to Fire From 2001 to 2019, Frontiers in Remote Sensing. Volume 3 https://www.frontiersin.org/journals/remote-sensing/articles/10.3389/frsen.2022.825190/full
U.S. Forest Service. (2022). Managing fire. https://www.fs.usda.gov/science-technology/fire
USGCRP. (2023). USGCRP indicators platform: Heat waves. https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves
Vecchi, Gabriel A. and Thomas R. Knutson (2011) "Estimating Annual Numbers of Atlantic Hurricanes Missing from the HURDAT Database (1878–1965) Using Ship Track Density," Journal of Climate 24, no. 6 (2011): 1736–1746, https://doi.org/10.1175/2010JCLI3810.1.
Villarini, Gabriele, Gabriel A. Vecchi, and James A. Smith, "U.S. Landfalling and North Atlantic Hurricanes: Statistical Modeling of Their Frequencies and Ratios," Monthly Weather Review 140, no. 1 (January 2012): 44–65, https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00063.1.

Web Archive. (n.d.). Archive of NIFC fire data. https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html

Yang, L., Y. Yang, Y. Shen, et al. (2024). Urban development pattern's influence on extreme rainfall occurrences. Nature Communications, 15, 3997. https://doi.org/10.1038/s41467-024-48533-5

Zhang, W., G. Villarini, G.A. Vecchi, and J.A. Smith, J. A. (2018). Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. Nature, 563, 384–388. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z

7 TENGERSZINTVÁLTOZÁSOK

Fejezet-összefoglaló

1900 óta az átlagos tengerszint globálisan körülbelül 8 hüvelykkel (kb. 20 cm-rel) emelkedett. Az Egyesült Államok partjai mentén a tengerszintváltozás rendkívül változó: összefüggésben áll a süllyedésre vezető folyamatok helyi változásaival, valamint az óceáni áramlási mintázatokkal. Az Egyesült Államok partjainál a legnagyobb mértékű tengerszint-emelkedés Galveston, New Orleans és a Chesapeake-öböl régióiban figyelhető meg – e helyek mindegyikén jelentős helyi szárazföldi süllyedés (süppedés) tapasztalható, ami az éghajlatváltozással nincs összefüggésben.

A globális tengerszint-emelkedés szélsőséges előrejelzései egy valószínűtlen, szélsőséges kibocsátási forgatókönyvből, valamint egy jégtakaró-instabilitást feltételező folyamat félreértéséből erednek. Az AR6 2050-re vonatkozó előrejelzéseinek értékelése idején (az 1995-2014 közötti időszakra vonatkoztatva) 2025-re az időszak közel fele eltelt, a tengerszint pedig az előre jelzettnél lassabb ütemben emelkedik. Az Egyesült Államok mareográfjainak (partmenti tengerszint-mérőinek) mérési adatai nem mutatnak a tengerszint-emelkedés történelmi üteménél nagyobb gyorsulást.

7.1 Globális tengerszint-emelkedés

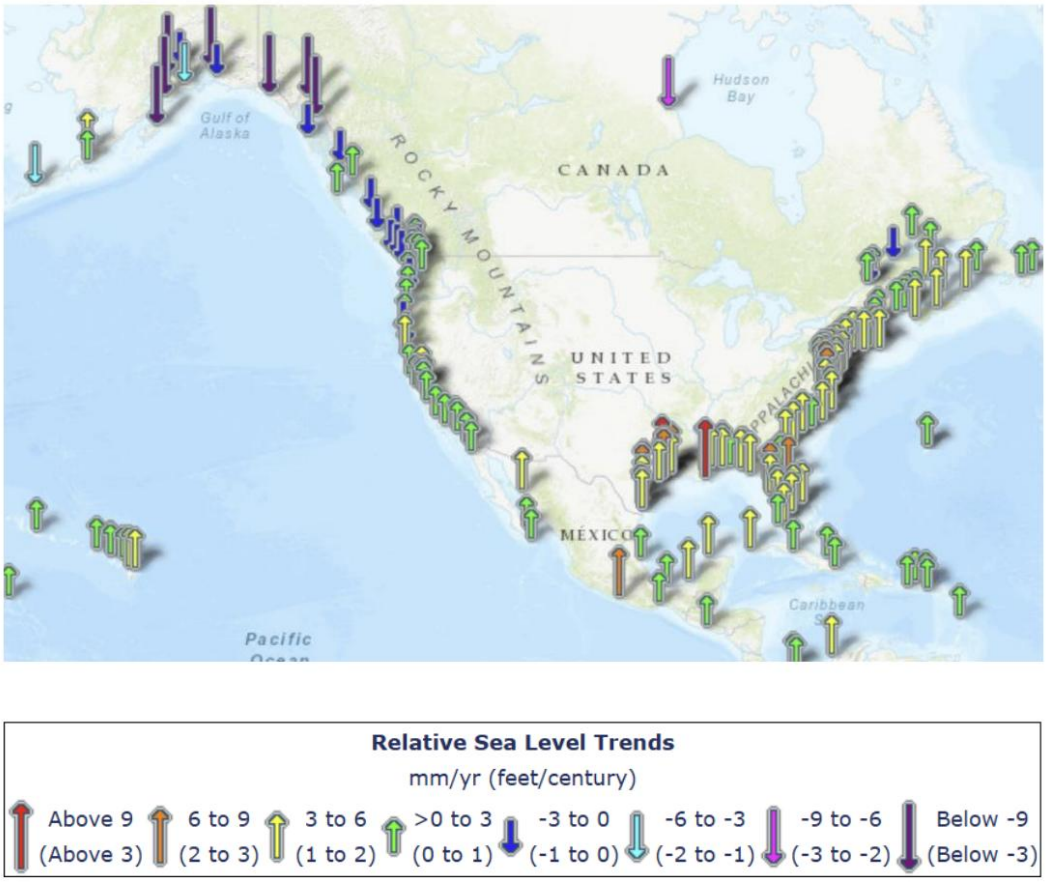
A globális tengerszint-emelkedés vitathatatlanul a legfontosabb éghajlati hatásmechanizmus, amely egyértelműen összefügg a hőmérséklet emelkedésével. Globális szinten a felmelegedés a tengervíz hőtágulása, valamint a gleccserek és jégtakarók olvadása révén emeli a tengerszintet. A szárazföldi víztárolás változásai egy másik fontos tényezőt jelentenek. Regionális szinten a tengerszint változását a nagymértékű óceáni cirkulációs mintázatok, valamint a jég és a víz újraeloszlásából eredő geológiai folyamatok és deformációk befolyásolják. Lokálisan a geológiai folyamatokból, a talajvíz-kivonásból és a fosszilis tüzelőanyagok kitermeléséből eredő függőleges szárazföldi mozgás is fontos.

Az AR6 becslése szerint a globális átlagos tengerszint 1901 és 2018 között 7,9 (5,9–9,8) hüvelykkel emelkedett, és a tengerszint-emelkedés üteme az elmúlt évtizedekben gyorsult. Az óceáni medence szintjén az 1993–2018 közötti időszakban a tengerszint a Csendes-óceán nyugati részén emelkedett a leggyorsabban, a Csendes-óceán keleti részén pedig a leglassabban (Fox-Kemper et al., 2021). A globális tengerszint-emelkedés ütemét évi 0,12 hüvelykre becsülik, ami körülbelül két egymásra rakott egypenny-s érme magasságának felel meg (NASA, 2020).

A globális tengerszint-emelkedés megfigyelőrendszerei jelentősen fejlődtek a műholdas korszakban, különösen a műholdas magasságmérők 1993-as megjelenésével. A helyi partmenti tengerszintmérők (mareográfok) hasznos adatokat szolgáltatnak az elmúlt évszázadra, sőt néhány helyszín esetében még hosszabb időre visszamenően is. A Kis Jégkorszak tizenkilencedik század közepi véget érését követően a tengerszintmérők azt mutatják, hogy a globális átlagos tengerszint az 1820–1860 közötti időszakban kezdett emelkedni, jóval az antropogén üvegházgáz-kibocsátás meglódulása előtt.

7.2 Az USA tengerszint-emelkedése

A globális átlagos tengerszint-emelkedés megfigyelt és előre jelzett ütemének helyi folyamatok miatt bizonyos helyszíneken kevés klímatudományi jelentősége lehet (NOAA, 2025). A 7.1. ábra azt mutatja, hogy Kanadában és Alaszkában (valamint Washington északi részén) a tengerszint a glaciális visszahatásból eredő emelkedés miatt csökken. A csendes-óceáni partvidék tengerszint-mérőinek többsége alacsony tengerszint-emelkedési ütemet mutat, míg az Egyesült Államokban a legnagyobb értékek a Mexikói-öböl partján (Louisiana és Texas), valamint az Atlanti-óceán középső részén fekvő államokban (a Chesapeake-öböl régiójában) figyelhetők meg.



7.1. ábra: Az Egyesült Államok partvidékének relatív tengerszint-emelkedési ütemét ábrázoló térkép (NOAA, https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/). Referenciaként 3 mm = 0,12 hüvelyk.

A mareográfok által mért relatív tengerszint-emelkedés összemossa a tengervíz térfogatának éghajlati szempontból releváns növekedését a lokális függőleges szárazföldi mozgással. Ez utóbbit, amely helyenként változik, a legjobban egy, a mareográf közelében elhelyezett GPS-állomással lehet mérni. A szárazföldi mozgást számos folyamat vezérli, és hatásuk összehasonlíthatók az éghajlati jellel, és lokálisan súlyosbíthatják (süllyedés/süppedés esetén) vagy enyhíthetik (emelkedés esetén) a tengerszint-emelkedés kockázatát (Wöppelmann és Marcos, 2016). A süllyedést kiváltó emberi tevékenységek gyakran jelentősek. Ilyen például a talajvíz elvezetése (pl. városfejlesztés céljából) és a talajvíz vagy a szénhidrogén felszín alóli kitermelése.

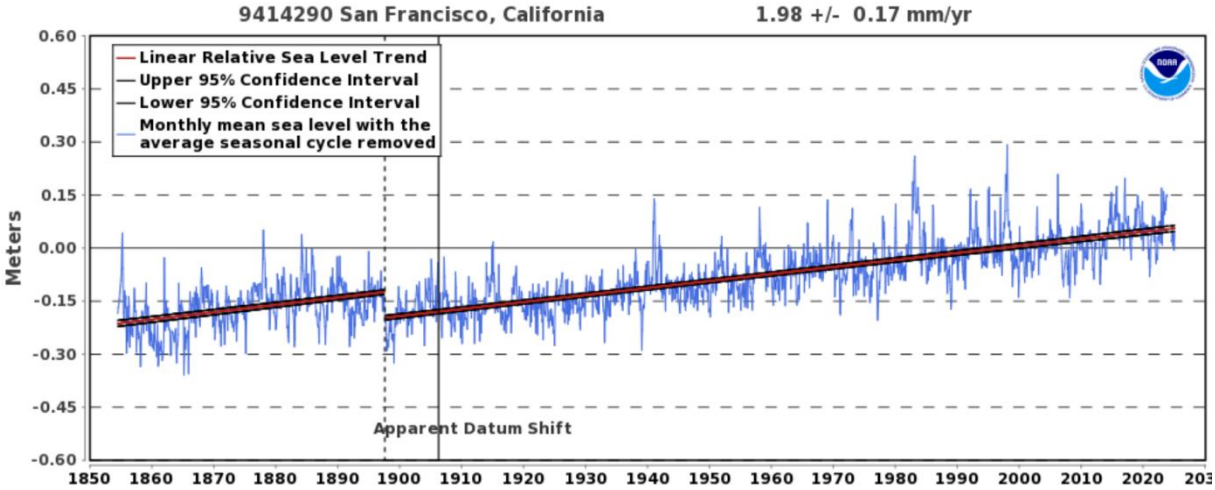
A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést (ASLR) mutatja olyan kiválasztott helyszíneken, amelyeket a korrigálatlan relatív tengerszint-emelkedés (RSLR) összegéből - mareográf idősorokból (NOAA, 2025) és a függőleges szárazföldi mozgás (VLM) méréséiből (NAS, 2012; Letetrel et al., 2015; Karegar et al., 2016) becsülve – határoztak meg. Ezen helyszínek mindegyikén az abszolút tengerszint-emelkedés a helyi süllyedés miatt lényegesen kisebb, mint a mért relatív tengerszint-emelkedés. A mért relatív tengerszint-emelkedés több mint fele e helyszíneken a szárazföld süllyedésének tulajdonítható: San Francisco, Galveston, Grand Isle. Összehasonlításképpen, az abszolút tengerszint-emelkedés globális átlagos mértéke becslések szerint 0,12 hüvelyk/év.

Location	RSLR	VLM	ASLR
San Francisco, CA	+0.08	-0.06	+0.02
Galveston, TX	+0.26	-0.19	+0.07
Grand Isle, LA	+0.36	-0.28	+0.08
St Petersburg, FL	+0.12	-0.02	+0.10
New York City, NY	+0.11	-0.05	+0.06

7.1. táblázat: Abszolút tengerszint-emelkedés (hüvelyk/év, ASLR), amely a relatív tengerszint-emelkedésből (RSLR) és a függőleges szárazföldi mozgásból (VLM) tevődik össze.

San Francisco-öböl

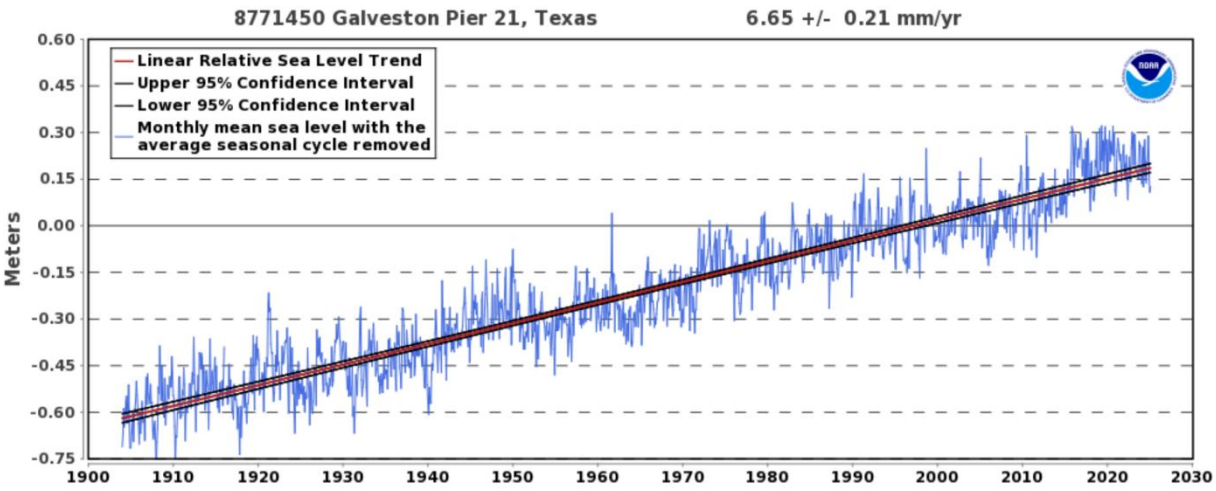
A legutóbbi évszázad során a San Francisco-öböl térségében a relatív tengerszint 7,8 hüvelykkel emelkedett, átlagosan 0,08 hüvelyk/év sebességgel (7.2. ábra). Amint a 7.1. táblázat mutatja, San Francisco függőleges szárazföldi mozgása -0,06 hüvelyk/év (süllyedés), ami a közelmúltbeli abszolút sebességet +0,02 hüvelyk/évnek adja ki. A Treasure Island, a San Francisco-i Nemzetközi Repülőtér és Foster City egyes részei akár 0,4 hüvelyk/év sebességgel is süllyednek (Shirzaei és Bürgmann, 2018). A San Francisco-öböl térségében felmerülő problémákat, beleértve a repülőteret fenyegető veszélyeket is, elsősorban a korábban vizes élőhelyekként szolgáló hulladéklerakó övezetekben fellépő talajtömörödés okozza, nem pedig a globális tengerszint-emelkedés lassú kúszása.



7.2. ábra: Mareográf-mérések San Francisco-ban, Kaliforniában, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (letöltve: 2025.04.22.).

Galveston - Houston

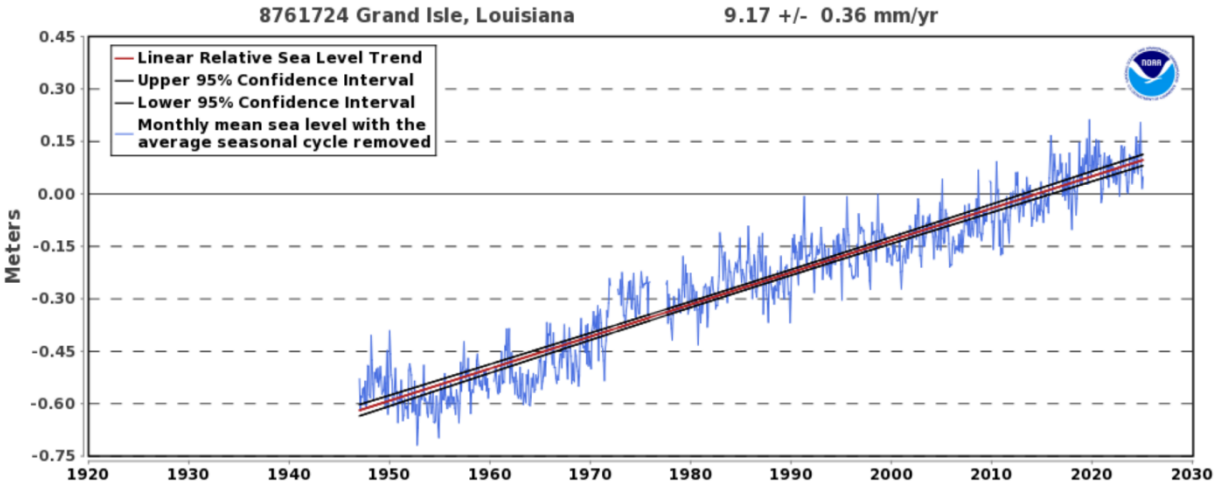
A Galveston 21-es mólónál végzett hosszú távú partmenti tengerszint-mérések (mareográf-mérések) az elmúlt évszázadban 2,18 láb tengerszint-emelkedést mutatnak, ami 0,26 hüvelyk/év sebességet jelent (7.3. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) Galvestonban -0,19 hüvelyk/évre becsülhető, ami az abszolút emelkedési sebességre +0,07 hüvelyk/év értéket ad ki (7.1. táblázat). Az Egyesült Államok Földtani Szolgálata (USGS) megállapította, hogy a Houston-Galveston régióban a szárazföldi süllyedés nagy része a talajvíz-kivonás közvetlen következménye (Kasmarek és Ramage 2017), ami a víztartó réteg üledékeinek tömörödését okozta, főként a finomszemcsés iszap- és agyagrétegekben. 1979-re Houstonban csaknem 10 lábnyi süllyedés következett be.



7.3. ábra: Mareográf-mérések a Galveston Pier-nél, Texasban, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (letöltve: 2025.04.22.).

New Orleans és a Mississippi-delta

A louisianai Grand Isle-ben végzett hosszú távú mareográf-mérések azt mutatják, hogy a tengerszint az elmúlt 100 évben valamivel több, mint 3 lábbal emelkedett, átlagosan 0,36 hüvelyk/év sebességgel (7.4. ábra). A függőleges szárazföldi mozgás (süllyedés) becslések szerint -0,28 hüvelyk/év. A 7.1. táblázat az abszolút tengerszint-emelkedést +0,08 hüvelyk/évnek adja meg.

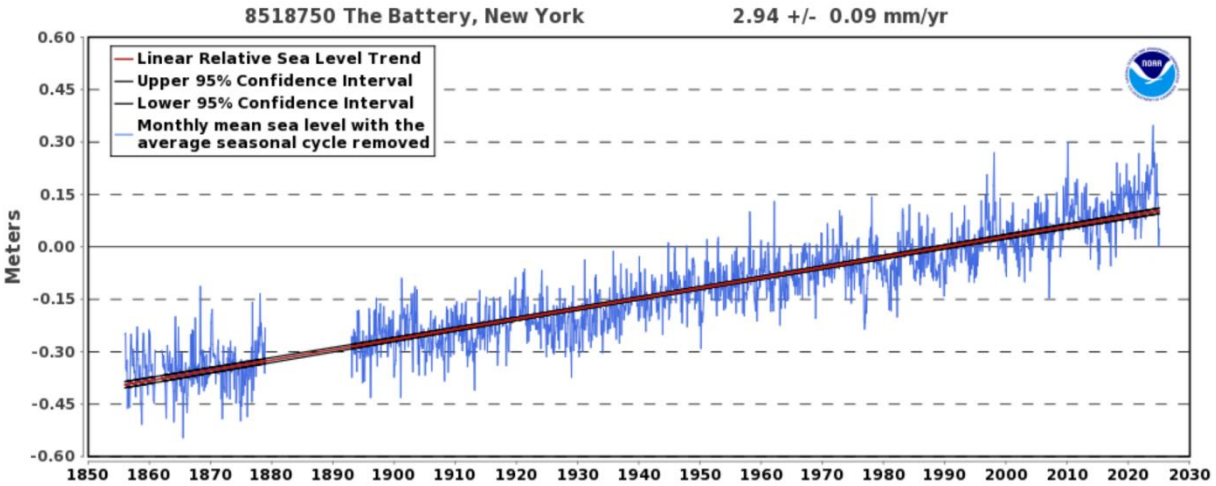


7.4. ábra: Mareográf-mérések Grand Isle-ben, Louisianában, a NOAA-tól beszerezve - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (letöltve: 2025.04.22.).

A Mississippi-delta régióban a tengerszint emelkedésének és a földveszteségnek a problémái összetettek. A fő okok: geológiai süllyedés és a Mississippi folyó által szállított üledék mennyiségének csökkenése. Az 1950-es évek óta a medencében épült gátak körülbelül 50 százalékkal csökkentették a Mississippi lebegő üledékterhelését (Maloney 2018). Louisiana partvidékének új süllyedési térképe szerint a part menti régió évente körülbelül 30 centiméterrel süllyed (Neinhuis et al. 2017), ami a talajvíz és az erőforrások kimerülésével jár. Mivel a város átlagos tengerszint feletti magassága 30-60 centiméterrel a tengerszint *alatt* van, az antropogén felmelegedésből eredő tengerszint-emelkedés aligha tekinthető a New Orleans-i problémák fő okának.

New York City

New York City különösen ki van téve a tengerszint-emelkedés hatásainak, mivel elsősorban szigeteken épült, és 830 kilométer hosszú partvonallal rendelkezik. Manhattan déli csücskében (The Battery) végzett mareográf-mérések azt mutatják, hogy a relatív tengerszint az elmúlt évszázadban több mint 28 cm-rel emelkedett, átlagosan 0,38 cm/év sebességgel (7.5. ábra). New York City területén azonban a függőleges szárazföldi mozgás -0,05 cm/év (nagyjából 12 cm/év), így a tengerszint abszolút emelkedésének mértéke a The Battery-nél 0,06 cm/év, ami a mért relatív tengerszint-emelkedés körülbelül 55 százaléka.



7.5. ábra: Mareográf-mérések The Battery-nél, New York államban; az adatok a NOAA-tól származnak - https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (letöltve: 2025.04.22.).

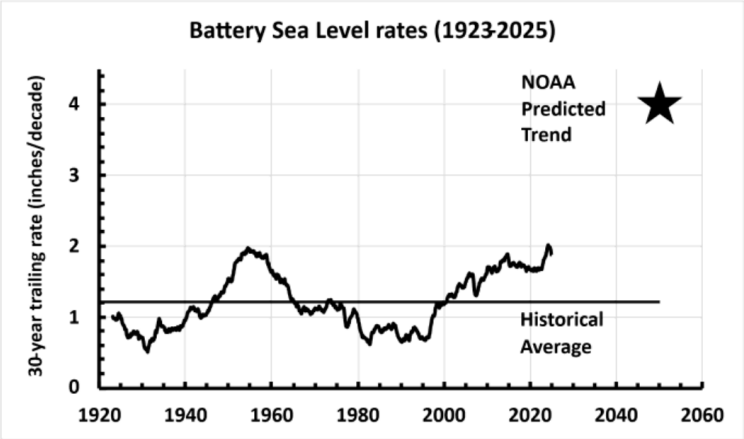
7.3 A várható tengerszint-emelkedés

A tengerszint-emelkedéssel kapcsolatos aggodalom nem az 1900 óta bekövetkezett nagyjából 20 centiméteres globális emelkedés miatt van. Hanem inkább a 21. században át tartó melegedő éghajlat szimulációin alapuló gyorsuló emelkedésre vonatkozó előrejelzések miatt.

Az AR6 *nagyfokú egyezést* talált a 2050-re vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között, amelyek a kibocsátási forgatókönyvekre mindannyian alig érzékenyek. Csak azokat az előrejelzéseket figyelembe véve, amelyek a jégtakaró folyamatait is figyelembe veszik, és amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* van, a 2050-re vonatkozó globális tengerszint-előrejelzés az összes kibocsátási forgatókönyv szerint 3,94 és 49,9 cm közé esik (5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az 1995–2014-es alapidőszakhoz képest (Fox-Kemper et al., 2021).

Ezzel szemben az AR6 kijelenti, hogy a 2100-ra vonatkozó, publikált globális átlagos tengerszint-előrejelzések között *kismértékű az egyezés*, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében. Ha csak azokat a jégtakaró-folyamatokat reprezentáló előrejelzéseket vesszük figyelembe, amelyek számszerűsítésében legalább *közepes megbízhatóság* áll fenn, az AR6 globális átlagos tengerszint-előrejelzése 2100-ra 7,9 és 39,4 hüvelyk között van (az 5–95. percentilis nagyon valószínű tartomány) az SSP2–4,5 közepes kibocsátási forgatókönyv szerint (Fox-Kemper et al., 2021). A 2100-ig előre tekintő tengerszint-emelkedésre vonatkozó előrejelzéseket nagy bizonytalanság övezi a jégtakaró instabilitásának bizonytalansága miatt, különösen a magasabb kibocsátási forgatókönyvek esetében.

2022 februárjában a NOAA közzétette az Egyesült Államok különféle partmenti helyeire vonatkozó tengerszint-emelkedési előrejelzéseit (Sweet et al., 2022). Azt állítják, hogy 2050-re a tengerszint 30 centiméterrel fog emelkedni a manhattani The Battery-nél (2020-hoz képest). Egy 30 centiméteres emelkedés harminc év alatt több mint kétszerese lenne a jelenlegi ütemnek, és körülbelül háromszorosa az elmúlt évszázad átlagos ütemének. Ebben a történelmi kontextusban a NOAA előrejelzése figyelemre méltó – ahogy a 7.6. ábra mutatja, drámai gyorsulást igényelne, amely a 20. század eleje óta megfigyelt összes ütemtrendet meghaladja. De még ennél is figyelemreméltóbb, hogy Sweet et al. (2022) szerint ez az emelkedés „kész tény – a jövőbeli kibocsátásoktól függetlenül meg fog történni”. Egy évtized múlva kiderül, hogy ennek az előrejelzésnek van-e alapja.



7.6. ábra: A tengerszint-emelkedés üteme a manhattani The Battery-nél. Az ábrán a harmincéves történelmi trend látható, valamint a NOAA által állítólagosan „kész tény”, a 2050-ig jelzett trend. Történelmi adatok: NOAA Tides and Current.

Hivatkozások

Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Adalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., ... & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1211–1362). Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Karegar, M. A., Dixon, T. H., & Engelhart, S. E. (2016). Subsidence along the Atlantic Coast of North America: Insights from GPS and late Holocene relative sea level data. Geophysical Research Letters, 43(7), 3126–3133. https://doi.org/10.1002/2016GL068015

Kasmarek, M. C., & Ramage, J. K. (2017). Water-level altitudes 2017 and water-level changes in the Chicot, Evangeline, and Jasper aquifers and compaction 1973–2016 in the Chicot and Evangeline aquifers, Houston-Galveston Region, Texas (Scientific Investigations Report 2017–5080). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/sir20175080

Letetrel, C., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2015). Estimation of vertical land movement rates along the coasts of the Gulf of Mexico over the past decades. Continental Shelf Research, 111(Part A), 42–51. https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.10.018

Maloney, J. M., Bentley, S. J., Xu, K., Obelcz, J., Georgiou, I. Y., & Miner, M. D. (2018). Mississippi River subaqueous delta is entering a stage of retrogradation. Marine Geology, 400, 12–23. https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.03.001

National Academy of Science (NAS, 2012). Sea-level rise for the coasts of California, Oregon and Washington: Past, present, and future. Appendix A: Vertical land motion and sea-level data along the West Coast of the United States. National Academies Press. https://nap.nationalacademies.org/catalog/13389/sea-level-rise-for-the-coasts-of-california-oregon-and-washington

NASA. (2020). NASA sea level rise portal: 2020 edition. https://www.nasa.gov/specials/sea-level-rise-2020/

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Center for Operational Oceanographic Products and Services. (n.d.). Sea level trends. https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/

NOAA Tides & Currents. (n.d.). Relative sea level trends. https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/

Nienhuis, J. H., Törnqvist, T. E., Esposito, C. R., Liang, M., & Ma, H. (2017). A new subsidence map for coastal Louisiana. GSA Today, 27(6), 28–29. https://doi.org/10.1130/GSATG337GW.1

Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. Science Advances, 4(3), eaap9234. https://doi.org/10.1126/sciadv.aap9234

Sweet, W. V., Hamlington, B. D., Kopp, R. E., et al. (2022). Global and regional sea level rise scenarios for the United States (USGS Report 70229139). United States Geological Survey. https://www.usgs.gov/publications/global-and-regional-sea-level-rise-scenarios-united-states

Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. Reviews of Geophysics, 54, 64–92. https://doi.org/10.1002/2015RG000502

8 BIZONYTALANSÁGOK A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSÁBAN

Fejezet-összefoglaló

Az attribúció (egy ok hozzárendelése valamely jelenséghez, „oktulajdonítás") az éghajlatváltozás valamely megnyilvánulása okának, mindenekelőtt az antropogén tevékenységnek a beazonosítására utal. Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos vita zajlik, különösen a szélsőséges időjárási események vonatkozásában. Az okok beazonosítását megnehezíti a nagy természetes változékonyság, a várható antropogén jel viszonylag kis értéke, a jó minőségű adatok hiánya és a hiányos éghajlati modellekre való támaszkodás. Az IPCC régóta figyelmeztet arra, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló módszerek eredendően bizonytalanok, és az oktulajdonítás végső soron a szakértői megítéléstől függ.

Az IPCC a CO_2 közelmúltbeli felmelegedésben betöltött szerepéről szóló főbb értékeléseinek lényegi kritikája a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelését, a napenergia-változékonyság és az aeroszolkényszer mérési bizonytalanságait, valamint az attribúcióhoz használt statisztikai módszerek problémáit teszi szóvá.

A szélsőséges eseményekhez kapcsolódó legtöbb éghajlati hatást kiváltó tényezőkkel kapcsolatosan az IPCC nem tesz attribúciós (oktulajdonítási) állításokat A globális szélsőségek statisztikáival kapcsolatos állítások (pl. események valószínűsége vagy visszatérési ideje, nagysága és gyakorisága) az adatok korlátozott volta miatt általában nem tekinthetők pontosnak, és ezeket gyenge megbízhatósággal szerepeltetik. Az egyes szélsőséges időjárási események attribúciója (oktulajdonítása) az esemény ritkasága miatt ébreszt kételyt. A 2021-es északnyugat-amerikai hőhullám okaival kapcsolatos ellentmondásos állítások jól mutatják az egyes szélsőséges eseményekkel kapcsolatos elhamarkodott oktulajdonítási állítások buktatóit.

8.1 Bevezetés

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) különbséget tesz az éghajlatváltozás észlelése és az éghajlatváltozás attribúciója (okának hozzárendelése, oktulajdonítása) között. Az AR6 WGI szószedet (IPCC, 2025) meghatározása szerint:

> *Észlelés:* A változás észlelése az a folyamat, amelynek során kimutatjuk, hogy az éghajlat vagy az éghajlat által érintett rendszer valamilyen meghatározott statisztikai értelemben megváltozott, anélkül, hogy megadnánk a változás okát. Egy beazonosított változás akkor mutatkozik meg a megfigyelésekben, ha a véletlenszerű, pusztán a belső változékonyság miatti bekövetkezés valószínűsége kicsiny, például <10%.
>
> *Attribúció:* Az attribúció az a folyamat, amelynek során több ok-okozati tényező relatív hozzájárulását hozzárendeljük valamely változáshoz vagy eseményhez, a megbízhatóság formális értékelésével.

Mind az észlelés, mind az attribúció statisztikai elemzésre támaszkodik. Az észlelés arra összpontosít, hogy a változások elég jelentősek-e ahhoz, hogy az októl függetlenül kiemelkedjenek a véletlenszerű változásokból. Az attribúció a megfigyelt események összehasonlítását jelenti a modell által generált ellentmondásos esetekkel. Mivel éghajlati kísérleteket nem lehetséges végezni, az attribúció statisztikai következtetést igényel annak felmérésére, hogy az emberi tevékenység (például az üvegházgáz-kibocsátás) és a természetes tényezők (például a vulkánkitörések) mennyire járulnak hozzá a megfigyelt változásokhoz. Az attribúciós módszerek feltételezik, hogy a rendszer összes külső és belső mozgatórugója ismert és jelen van.

Az attribúciós módszerekről folyamatos tudományos viták zajlanak, különösen azokról, amelyek szélsőséges időjárási eseményeket tulajdonítanak az éghajlatváltozásnak. Az IPCC régóta figyelmeztet, hogy az éghajlattudományban az oksági összefüggések megállapítására szolgáló

módszerek eleve bizonytalanok, és a döntés végső soron a szakértői megítéléstől függ. Az AR4 I. munkacsoport (Hegerl et al., 2007) a következőképpen magyarázta ezt:

> Az éghajlatváltozás okainak „hozzárendelése" az a folyamat, amelynek során meghatározott megbízhatósági szinttel megállapítjuk a kimutatott változás legvalószínűbb okait... Az egyértelmű attribúcióhoz (hozzárendeléshez) az éghajlati rendszerrel ellenőrzött kísérletek elvégzésére lenne szükség. Mivel ez nem lehetséges, a gyakorlatban az antropogén klímaváltozási oktulajdonítás (attribúció) alatt azt értjük, hogy egy észlelt változás „összhangban van az antropogén és természetes kényszerítő tényezők adott kombinációjára adott becsült válaszokkal", és „nem egyeztethető össze a közelmúltbeli klímaváltozás alternatív, fizikailag hihető magyarázataival, amelyek kizárják az adott kényszerítő tényezők kombinációjának fontos elemeit" (IPCC, 2001)… A fent leírt, észlelési és attribúciós kutatásokban alkalmazott megközelítések nem tudják teljes mértékben figyelembe venni az összes bizonytalanságot, ezért végső soron szakértői megítélésre van szükség ahhoz, hogy hiteles értékelést legyen adható arról, hogy egy adott ok felelős-e egy adott klímaváltozásért.

Az AR5 II. Munkacsoport (Cramer et al., 2014) a következőt nyilatkozza:

> A klímaváltozás hatásainak észlelésével (a detektálással) és hozzárendelésével (az attribúcióval) kapcsolatos két fő kihívás a megfigyelésekhez és a folyamatok megértéséhez kapcsolódik. A megfigyelési oldalon ritkák a természeti és emberi rendszerekkel, valamint az azokat befolyásoló többszörös tényezőkkel kapcsolatos kiváló minőségű, hosszú távú adatok. Ezenkívül a klímaváltozás hatásainak detektálása és hozzárendelése megköveteli azoknak a folyamatoknak a megértését, amelyek révén a klímaváltozás más tényezőkkel együtt befolyásolhatja a szóban forgó rendszert.

Az éghajlati rendszerben az ok-okozati láncok összetettsége miatt ezen kapcsolatok vizsgálata rendkívül nagy kihívást jelent.

8.2 Oktulajdonítási módszerek

A megfigyelt éghajlatváltozások okainak kiértékelésére az IPCC számos attribúciós (oktulajdonítási) módszert alkalmaz, hogy elkülönítsék a természetes és az ember által okozott tényezőket. Az alábbiakban a legfontosabb IPCC attribúciós módszerek tömör leírását találjuk.

Az optimális ujjlenyomat-elemzés a megfigyelt éghajlati adatok változásainak magyarázatára lineáris regressziót használ, antropogén kényszerítő tényezők figyelembe vételével és azok nélkül futtatott éghajlati modell-szimulációk súlyozott összegeként. A regressziós modellben használt adatokat súlyozzák, hogy megpróbálják minimalizálni a véletlenszerű zaj hatását, és a becslési módszert úgy választják meg, hogy figyelembe vegye az éghajlati modell hibáját.

Az idősoros elemzés az antropogén kényszerítő tényezők és a természetes változékonyság közötti statisztikai különbségeket használja ki annak megállapítására, hogy melyik dominál a megfigyelt hőmérsékletekben, és a változások időzítésének változásait is felhasználja annak meghatározására, hogy kikövetkeztethető-e az ok-okozati összefüggés az adatsorok között.

A folyamatalapú attribúció a megfigyelt változások mögött meghúzódó fizikai mechanizmusok megértésére összpontosít. Ez a megközelítés ötvözi a megfigyeléseket, az éghajlati modelleket és az elméleti ismereteket, hogy a specifikus folyamatok változásait a kényszerítő tényezőknek lehessem tulajdonítani. Ezt a megközelítést gyakran alkalmazzák regionális éghajlati jelenségek, például monszunváltozások vagy sarkvidéki amplifikáció esetén.

A szélsőséges esemény-hozzárendelés az emberi befolyás szerepét vizsgálja a szélsőséges időjárási események (pl. hőhullámok vagy aszályok) előfordulásának valószínűségében vagy intenzitásában. A módszerek a következők:

- A valószínűségi esemény-hozzárendelés az éghajlati modell szimulációk nagy együtteseit használja a megfigyelt események és a modell által generált ellentmondásos (kontrafaktuális) esetek összehasonlítására.
- A történetalapú megközelítés az eseményeket előidéző fizikai folyamatokat vizsgálja, és értékeli ki, hogy az antropogén kényszerítő tényezők hogyan módosíthatták ezeket a folyamatokat.

8.3 A globális felmelegedés oktulajdonítása

A három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben a globális felmelegedéssel kapcsolatos oktulajdonítási (attribúciós, hozzárendelési) állítások a következők:

> AR4: A 20. század közepe óta megfigyelt globális átlaghőmérséklet-**növekedés legnagyobb része v**alószínűleg az antropogén üvegházhatású gázok koncentrációjának megfigyelt növekedésének köszönhető (IPCC 2007).
>
> AR5: *Rendkívül valószínű*, hogy a globális átlagfelszín-hőmérséklet 1951 és 2010 között **megfigyelt emelkedésének több mint felét** az üvegházgáz-koncentráció antropogén eredetű növekedése és egyéb antropogén tényezők együttesen okozták. Az ember okozta felmelegedéshez való hozzájárulás legjobb becslése hasonló mértékű, mint az ugyanebben az időszakban megfigyelt felmelegedés. (IPCC 2013)
>
> AR6: Az ember okozta globális felszíni hőmérséklet-emelkedés valószínűsíthető tartománya 1850–1900 és 2010–2019 között 0,8°C és 1,3°C között van, a legjobb becslés 1,07°C. Valószínű, hogy a jól kevert üvegházhatású gázok 1,0°C és 2,0°C közötti felmelegedést, egyéb emberi tényezők (főként aeroszolok) 0,0°C és 0,8°C közötti lehűlést okoztak, a természetes tényezők pedig –0,1°C és +0,1°C közötti mértékben változtatták a globális felszínhőmérsékletet, míg a belső változékonyság –0,2°C és +0,2°C közötti mértékben változtatott. Nagyon valószínű, hogy 1979 óta a troposzféra-felmelegedés fő mozgatórugói a jól kevert üvegházhatású gázok (IPCC 2021).

Az AR4 és AR5 attribúciós nyilatkozatok a 20. század közepe óta tartó felmelegedésre utalnak, arra az időszakra, amikor az üvegházgáz-kibocsátásban gyors növekedés kezdődött. A „legtöbb” és a „több, mint a fele” szavak szándékosan pontatlanok, a felmelegedés 51 és 99 százaléka között mozoghatnak. E pontatlanság feltehetően a strukturális bizonytalanságok, például a természetes belső változékonyság figyelembevételét szolgálja. A megbízhatósági szint az AR4-től az AR5-re *nagyon valószínűről rendkívül valószínűre* nő. Az AR6-ban szereplő attribúciós állítás szerkezete alapvetően eltérő, a felmelegedést az 1850–1900 közötti időszakra vonatkoztatják. Az AR6 attribúciós állítása számszerűen pontosabb, bár a „valószínű” egy alacsonyabb megbízhatósági szintet jelent – az AR6 a felmelegedést lényegében teljes egészében az üvegházgáz-koncentráció emelkedésének tulajdonítja. Az AR6 leginkább magabiztos állítása az 1979 óta bekövetkezett troposzférikus felmelegedéssel kapcsolatos, a „fő mozgatórugó” és a „nagyon valószínű” szavak használatával.

Az IPCC a jelenkori felmelegedés okainak értékelésével kapcsolatban három területen kap érdemi kritikát: a természetes éghajlati változékonyság nem megfelelő értékelése, nem megfelelő statisztikai módszerek, valamint a modellek és a megfigyelések közötti jelentős eltérések. Az utóbbit az 5. fejezet tárgyalja, míg ez a fejezet az első két tényezőt veszi számba. Mindezek a kritikák a jelenkori felmelegedés IPCC-attribúciójára vonatkoznak, amelyben az IPCC még a szélsőséges események attribúcióját is alátámasztotta.

8.3.1 Természetes éghajlati változékonyság

Az AR6 kijelenti, hogy az 1850-1900 közötti természetes külső tényezők a globális felszíni hőmérsékletet –0,1°C és +0,1°C közötti értékben változtatták, a belső változékonyság pedig –0,2°C-és +0,2°C közötti értékben – átlagosan lényegében nem voltak semmilyen nettó hatással az 1850-1900 közötti felmelegedésre. Amint azt alább tárgyaljuk, a természetes változékonyság ezen minimális hozzájárulását számos publikáció vitatja, megkérdőjelezve a napenergia-változékonyság és a nagyléptékű óceáni cirkulációkból eredő belső változékonyság elhanyagolhatóságát

Napsugárzás-változékonyság

Az AR5 arra a következtetésre jutott, hogy az 1750–2011 közötti időszakban a teljes napsugárzás (TSI) változásai miatti sugárzási kényszer a legjobb becslés szerint nagyon csekély volt (0,05 W/m^2, Myrhe et al., 2014). Az AR6 az elmúlt évszázadokra lényegesen magasabb értékeket és a TSI változás-becslésre sokkal szélesebb tartományt ismer el, kijelentve, hogy a TSI a Maunder-minimum (1645–1715) és a huszadik század második fele között 0,7–2,7 W/m^2-rel nőtt, ez a tartomány magában foglalja mind az alacsony, mind a magas változékonyságú TSI adatkészleteket (Gulev, 2021). Az AR6-ban attribúciós vizsgálatokhoz használt CMIP6 klímamodell-szimulációkhoz ajánlott kényszerítő adatkészlet azonban két alacsony napsugárzási változékonyságú adatkészlet átlagát veszi alapul (Matthes, 2017).

Bár az AR6 lényegesen nagyobb napsugárzási hatást mutat, mint az AR5, a napsugárzás éghajlatra gyakorolt teljes hatását az antropogén kényszerhez képest továbbra is csekélynek értékelték. A napváltozások éghajlatra gyakorolt hatása azonban bizonytalan, és ma is jelentős vita tárgyát képezi (Lockwood, 2012; Connolly et al., 2021) – ami az IPCC értékelő jelentéseiben nem derül ki.

A TSI időbeli változása továbbra is kihívást jelent. 1978 óta műholdak mérik közvetlenül a TSI-t. Az adatok azonban nem elhanyagolható ellentmondásokról tanúskodnak, úgyhogy a TSI több évtizedes trendjeinek értelmezéséhez időben átfedő műhold-megfigyeléseket kell egymással összehasonlítani. Számos egymással versengő összetett TSI adatkészlet létezik, amelyek között eltérés van abban, hogy az 1986–96 közötti időszakban a TSI nőtt-e vagy csökkent az (ez az ún. az ACRIM-hézag; lásd a 4. fejezetet). Továbbá a TSI műholdas adatait olyan proxy modellek kalibrálására használják, amelyek a napfoltokból és a kozmogén izotópmérésekből következtetnek a múltbeli napváltozásokra (Velasco Herrera et al., 2015).

Jelentős bizonyítékok vannak arra, hogy a 20. század második felében (1959-tel kezdődően) erős naptevékenység volt megfigyelhető, amely az 1990-es évekig terjedt, mielőtt a 21. század elején hanyatlás következett volna be; ezt az időszakot gyakran nevezik „modern maximumnak" (Chatzistergos et al., 2023; Solanki et al., 2004; Usoskin et al., 2007). Egyes kutatók azonban arra a következtetésre jutottak, hogy nem lehet teljes bizonyossággal kijelenteni, hogy a TSI több évtizedes trendje is változhat (Schmutz, 2021).

E bizonytalanság azt eredményezi, hogy a TSI egyes 1750-től kezdődő rekonstrukciói alacsony változékonyságot mutatnak (ami a napváltozások nagyon alacsony hatását sugallja a globális felszíni átlaghőmérsékletre), míg a magas TSI-változékonyságú adatsorok az iparosodás előtti idők óta a hőmérséklet-változások több mint 70 százalékát megmagyarázhatják (Scafetta, 2013; Stefani, 2021). Az elemzésben használt TSI műholdfelvételek megválasztása ezért jelentősen befolyásolhatja, hogy az éghajlatváltozást mennyiben tulajdonítják az emberi, illetve a természetes kényszereknek. Egyre több bizonyíték van arra, hogy a napsugárzás változékonyságának egyéb vonatkozásai, amelyeket közvetett napenergia hatásoknak neveznek, vagy felerősítik a TSI-kényszert, vagy a TSI-kényszertől függetlenek. Scafetta et al. (2023) szerint a napenergia éghajlatra gyakorolt hatásának ~80 százaléka nem TSI-mechanizmusokból eredhet. Számos lehetséges folyamat létezik, beleértve a Nap ultraibolya-változásait; a nagyenergiájú részecskék kicsapódását; a légelektromos tér hatását a felhőzetre; a Nap által modulált galaktikus kozmikus sugárzás által előidézett felhőzetváltozásokat; a mágneses tér nagy relatív változásait; és a napszél erősségét. Effajta közvetett naphatásokat az éghajlati modellek nem tartalmaznak, bár a hatásuk becslésére szolgáló közvetett módszerek azt sugallják, hogy jelentősek. Az

éghajlatot befolyásoló nem TSI-mechanizmusokra vonatkozó állítások azonban bizonytalanok és vitatottak.

A nagyléptékű óceáni cirkulációk természetes változékonysága

A globális felszínhőmérséklet átlagos változásai összefüggenek az óceáni cirkulációs minták visszatérő nagyléptékű változásaival, beleértve az Atlanti-óceán több évtizedes oszcillációját (AMO), a Csendes-óceán évtizedes oszcillációját (PDO), valamint az El Niño-Déli oszcillációt (ENSO). Ezek a cirkulációk befolyásolják az óceán hőfelvételét és hőeloszlását, valamint a légköri cirkulációs mintákat és a felhőeloszlást. Vita folyik arról, hogy ezek a változások szigorúan az éghajlati rendszer belső tényezői-e, vagy lehet-e nap-/csillagászati eredetű, esetleg befolyásolhatják-e nagy vulkánkitörések.

Bár az éghajlati modellek szimulálják a nagyléptékű óceáni cirkulációkat és a belső éghajlati változékonyságot, a legtöbb modell a több évtizedre visszamenő megfigyelésekhez képest túl kicsi amplitúdót mutat, és a modellnek a megfigyelt éghajlattal való együttes változása fokozatosan eltűnik (Kravtsov et al. 2024). Több szimuláció átlagolása hatékonyan átlagolja a belső változásokat, és csak a kényszerített éghajlati változékonyságot hagyja meg (pl. CO_2-kényszerítés). Mivel a jelenkori felmelegedés nagy része az 1970-es évek végén kezdődött, a mostani 50 éves felmelegedés időléptékben ugyanaz, mint az AMO és a PDO több évtizedes oszcillációi.

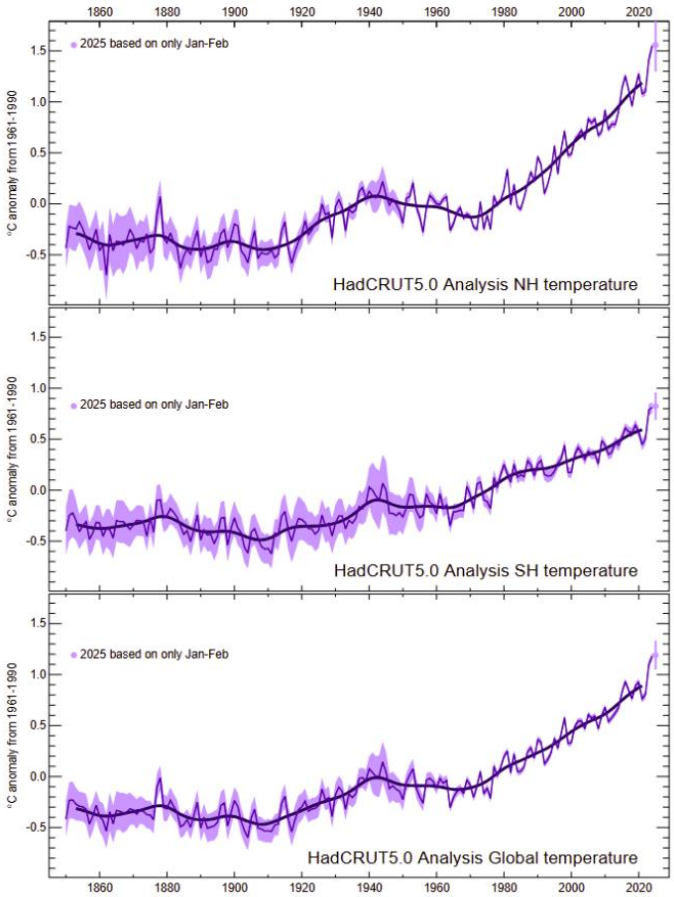
Az AR5 és AR6 jelentések összefoglaló megállapításai:

> AR5: A Csendes-óceán évtizedes változékonysága, amely a PDO-hoz vagy az IPO-hoz kapcsolódik [IPO: évtizedek közötti - interdekádos - csendes-óceáni oszcilláció], jelentősen hozzájárul a regionális és globális hőmérsékleti trendekhez, de a belső változékonyság és a külső kényszer relatív hozzájárulását nehéz a CMIP5 szimulációkban szétválasztani.
>
> AR6: Az AR5 óta egyre jobban megértjük a belső változékonyság, például az ENSO, a PDO és az AMO szerepét a regionális éghajlati trendek modulálásában. Azonban ezen módusok pontos időzítésével és amplitúdójának szimulációjával kapcsolatos CMIP6 modellkorlátok következtében (is) a megfigyelt változások antropogén kényszernek való tulajdonítása bizonytalan (*nagy megbízhatóságú* megállapítás).

A több évtizedes oszcillációk globális hőmérsékletre gyakorolt csúcspont-mélypont hatásának amplitúdóját az IPCC AR6 a következőképpen értékelte: „A belső változékonyság miatti változás valószínűsíthető tartománya -0,2°C és +0,2°C között van (IPCC, 2021).” Ez 0,4°C-os mélypont-csúcspont változást jelent. Évszázadokon keresztüli globális hőmérséklet-változások folyamán a mélypontok és a csúcspontok hatása kioltódnak, és a nettó hatás csekély vagy nulla.

Az olyan oszcillációk esetében azonban, mint az AMO és a PDO, a csúcspontok és mélypontok időzítése összetéveszthető az évszázados trenddel. E kérdés az elmúlt 50 év felmelegedésének oktulajdonításában (amikor a közelmúltbeli felmelegedés nagy része bekövetkezett) nagyon fontossá válik. Még ha a klímamodellek a több évtizedes oszcillációk helyes amplitúdójával is rendelkeznek, a csúcspontok és mélypontok időzítése nincs megfelelően szimulálva, mivel minden modell és az egyes együttesek eltérő fázisokat szimulálnak. Miután a modellegyüttes tagjainak és a különféle modelleknek a szimulációit átlagolták, a természetes belső változékonyság hozzájárulása a fáziskülönbségek miatt kiátlagolódik, ami a természetes belső változékonyság szerepét az attribúciós folyamatban gyakorlatilag kioltja.

A globális felszínhőmérséklet-anomáliák 1850 óta tartó idősorai (8.1. ábra) egy általános felmelegedést mutató trendhez hozzáadódóan jelentős amplitúdójú szabálytalan változásokat mutatnak, és 1976 után az északi és a déli félteke közötti trendben markáns különbség alakul ki. Az 1905-1945 közötti időszak erős felmelegedési tendenciát mutatott. A következő 30 évben, 1945-1976 között, enyhén csökkenő hőmérsékleteket tapasztaltak. A legutóbbi felmelegedési időszak 1977-ben kezdődött.



8.1. ábra: A globális átlagos felszínhőmérséklet-anomália 1850–2025 között. Fent: Északi félteke. Középen: Déli félteke. Alul: Globális átlag. Forrás: UK Hadley Centre https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf

A 20. század eleji felmelegedés okait Hegerl et al. (2017; 2019) tárgyalja. A légköri CO_2-koncentráció 298 ppm-ről (1905) 310 ppm-re (1941) nőtt, ami arra utal, hogy a CO_2-nek csekély volt a hatása. A vulkáni aktivitás ebben az időszakban nagyon alacsony szintű volt, a napenergia-kényszer pedig bizonytalan. Hegerl et al. (2017) valamilyen módon mégis arra következtetett, hogy ennek a felmelegedésnek a 40-54 százaléka külső kényszernek tulajdonítható, a többi pedig belső változékonyságnak. Bronniman et al. (2024) a 20. század első évtizedében a déli féltekén bekövetkezett lehűlés okaira összpontosított. Megállapította, hogy a lehűlés a Csendes-óceán La-Niña-szerű mintázatához, egy hűvös trópusi és szubtrópusi Dél-Atlanti-óceánhoz, egy hideg extratrópusi Dél-Csendes-óceánhoz és hűvös déli közepes szélességi körökön található szárazföldi területekhez kapcsolódott. A Déli Gyűrűs Módus (SAM) pozitív volt, erősödött az Amundsen-Bellingshausen-tengerek alacsony értékével, bár az adatok szórása jelentős.

Az 1930-as évek felmelegedése és az azt követő lehűlés a század közepén különösen hangsúlyos volt az Arktiszon. Bokuchava és Semenov (2021) megállapították, hogy ezeket a változásokat valószínűleg az Észak-Atlanti-óceán és az Észak-Csendes-óceán hosszú távú természetes éghajlati változásainak együttes hatása okozta, hozzájárulva a lecsökkent vulkáni aktivitáshoz és a naptevékenység változásaihoz kapcsolódó természetes sugárzási kényszerhez, valamint az emelkedő üvegházgáz-koncentrációhoz. Tokinaga et al. (2017) kimutatta, hogy a 20. század elején a belsőleg generált csendes-óceáni és atlanti interdekádos (évtizedek közötti) változékonyság együttes hatása fokozta az Arktisz felmelegedését. A szinkronizált csendes-óceáni-atlanti felmelegedés drasztikusan megváltoztatja a bolygóméretű cirkulációkat az északi féltekén; ugyanezek a cirkulációs minták globális hatással is bírnak.

Az 1945 és 1976 közötti lehűlési időszakot „nagy szünetnek” nevezik. Számos okot feltételeztek: a csendes-óceáni évtizedes oszcillációval és az atlanti több évtizedes oszcillációval összefüggő ingadozásokból eredő természetes belső változékonyságot; az ipari tevékenységekből származó aeroszolkibocsátás növekedése miatti lehűlést; megnövekedett hőfelvételt az Atlanti-óceánban, a Déli-óceánban és az Egyenlítői-óceánban. Thompson et al. (2010) azt állapította meg, hogy a huszadik század közepén a két félteke hőmérsékleti trendjei közötti különbség nagyrészt az északi félteke tengerfelszín-hőmérsékletének 1968 és 1972 közötti gyors, körülbelül 0,3 °C-os csökkenésének tudható be.

Az 1976-1977-es nagy csendes-óceáni éghajlatváltozás egy figyelemre méltó éghajlati esemény volt. Ezt az északi Csendes-óceán légkör-óceán rendszerének hirtelen változása jellemezte, ami kölcsönhatásba lépett a globális éghajlati mintázatokkal. Ez az eltolódás szorosan összefügg a Csendes-óceáni Évtizedes Oszcillációval (PDO), amely évtizedek leforgása alatt oszcillál a meleg és a hideg fázisok között. Az 1976-os eltolódás átmenetet jelentett egy túlnyomórészt negatív (hideg) PDO fázisból (1947–1976) egy pozitív (meleg) fázisba (1977-től 2000-ig), jelentős következményekkel járva a globális és regionális éghajlati mintázatokra, beleértve az El Niño és a La Niña események gyakoriságát is. A Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást (GPCS) egybeesett a felgyorsult globális felmelegedés időszakának kezdetével. Ha a Nagy Csendes-óceáni Éghajlati Eltolódást figyelembe veszik az 1950 óta végzett éghajlati attribúciós elemzésekben, a 20. század második felében bekövetkezett felmelegedés 40 százalékát vagy annál többet a természetes belső változékonyságnak tulajdonítanak (McLean et al., 2009; Tung és Zhou, 2013; Chylek et al., 2016; Scafetta, 2021).

8.3.2 Optimális ujjlenyomatvétel

Az optimális ujjlenyomatvétel Allen és Tett (1999) által bevezetett statisztikai technika. A megfigyelt éghajlati adatokat éghajlati modellszimulációkkal hasonlítják össze abból a célból, hogy azonosítsák az emberi vagy természetes kényszerekhez kapcsolódó mintázatokkal (vagy „ujjlenyomatokkal”). A módszer magában foglalja az észlelt éghajlati változások egy vektorának – például a világ különféle pontjain mért felmelegedési ütemeknek – együttes figyelembe vételét, és súlyozott összegű „jelek”-re való bontását, hogy a különböző típusú kényszerekkel rendelkező éghajlati modellek által generált modellmegfigyelésekkel azonos eredményt kapjanak. A súlyokat a Teljes Legkisebb Négyzetek Elmélete (TLS) nevű regressziós módszerrel választják ki. Az elemzés általában csak két jelet használ, az egyiket csak antropogén kényszereket használó modellek, a másikat pedig csak természetes kényszereket használó modellek generálják. Ha a jelhez tartozó becsült súlyozási együttható szignifikánsan eltér nullától, akkor a jelet „észleltnek” nevezik. Ha közel van 1-hez, akkor a jelet generáló modellt konzisztensnek mondják a megfigyelésekkel. Ha kisebb, mint 1, akkor az adott kényszer modellje túl erős, és csökkenteni kell, illetve fordítva. Mind a megfigyelt adatokat, mind a jeleket az éghajlati rendszer véletlenszerűségeinek modell által generált becslésével súlyozzák, hogy maximális súlyt adjanak azoknak a régióknak, ahol a természetes változékonyság minimális.

Az optimális ujjlenyomat-készítés az attribúciós kutatási szakirodalom elsődleges eszköze. Bár az IPCC 2001 óta széles körben használja és kiemelten kezeli, nagyon kevés szakirodalom vizsgálja az általa generált eredmények statisztikai tulajdonságait. Az egyik eredendő gyengesége az, hogy az eredmények az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezésektől függenek, különösen a természetes változékonyság ábrázolását illetően (IPCC AR5 10.2.3. fejezet).

McKitrick tanulmánysorozata (McKitrick 2021, 2022, 2023, 2025) megkérdőjelezte az optimális ujjlenyomat-készítési módszert, azzal érvelve, hogy az eredendően megbízhatatlan, és hogy az ökonometriából átvett gyakorlatok érvényesebb eredményeket adhatnak. A statisztikai elmélet megköveteli, hogy a regressziós modellek torzítatlan együtthatókat szolgáltassanak, ez esetben teljesül a Gauss-Markov feltételeknek nevezett feltételezési halmaz. McKitrick (2021) azzal érvelt, hogy az Allen és Tett (1999) módszertan sérti a Gauss-Markov feltételeket, ami potenciálisan torzított és inkonzisztens ujjlenyomat-együtthatókhoz vezet, aláásva a módszer megbízhatóságát. Chen et al. (2023) megerősítették ezt az elemzést, bár azzal érveltek, hogy a módszer nagyon szigorú

feltételezések mellett jó eredményeket hozhat. McKitrick (2022) és (2023) további aggodalmakat is megemlített, ugyanis a klímakutatók – a tudományos diszciplínák között gyakorlatilag egyedüliként– TLS-t használtak antropogén üvegházhatású gázok jel-együtthatóinak becslésére, annak ellenére, hogy annak a tendenciája instabil, hacsak nem áll fenn néhány olyan erős feltételezés, amelyek teljesülése a gyakorlatban nagy valószínűséggel lehetetlen. Az optimális ujjlenyomatvétel során a szokásosan felmerülő körülmények között a TLS-becslések nagy pozitív torzítást hordoznak magukban. Így minden olyan tanulmány, amely optimális ujjlenyomatvételhez anélkül használt TLS-t, hogy ellenőrizte volna annak alkalmazhatóságát az adott adatkörnyezetben, valószínűleg túlbecsülte az attribúciót.

McKitrick (2025) empirikus példát mutatott be a hagyományos optimális ujjlenyomatvétel eredményeinek és a mainstream ökonometriából származó módszereknek az összehasonlításáról. Az utóbbiakról ismert, hogy specifikus alkalmazások egyikeként jeldetektálásra is alkalmasak. Míg az IPCC optimális ujjlenyomatvételi módszere egy 1900 és 2010 közötti globális hőmérsékleti adathalmazon közel 1,0-es antropogén jel-együtthatót eredményez, a konzisztens módszer körülbelül 0,4-es együtthatót eredményez, amely az 1980 és 2010 közötti adatokon körülbelül 0,65-re emelkedik, ami azt jelenti, hogy az üvegházhatású gázokra adott modellválaszt körülbelül a felére kell csökkenteni, hogy optimálisan illeszkedjen a megfigyelésekhez. Ezzel szemben a természetes kényszerítő jel együtthatója 2,0 és 4,0 között van, ami azt jelenti, hogy a természetes kényszerítő éghajlati modelleket két-négyszeresére kell felszorozni, hogy megfeleljenek a megfigyelt éghajlatváltozásnak. A McKitrick (2025) által becsült ujjlenyomat-együtthatók, amikor az adatkészletben azokat a kényszerítő jelek generálására használt klímamodellek átlagos érzékenységének skálázására használják, 1,4°C-os átmeneti klímaérzékenységet mutatnak. Ez az érték összhangban van Lewis (2023) becslésével, amely egy másik becslési módszert és több független adatkészletet használ.

Ezek az eredmények azt mutatják, hogy az az alap, amiről kiindulva az optimális ujjlenyomat-módszert sokáig megbízhatónak tekintették, rossz. Annak meghatározásához, hogy mely eredmények statisztikailag robusztusak, a korábbi eredmények egyenkénti újravizsgálatára lenne szükség.

8.3.3 Idősoros módszerek

Az IPCC (AR5 WGI 10.2.2) felfigyelt az oksági összefüggések értékelésének az idősoros ökonometria szakirodalmából felmerült alternatív megközelítéseire. Ezeknek az az előnyük, hogy nem az éghajlati modellek pontosságára vonatkozó feltételezéseken alapulnak, hátrányuk viszont, hogy függenek az éghajlati és kényszerítő adatok mögött meghúzódó adatgeneráló folyamattal kapcsolatos, nehezen tesztelhető feltételezésektől. A ma klímaökonometriának nevezett módszerek olyasféle eszközöket használnak, mint egységgyök-tesztelés, Granger-oksági analízis és kointegrációs analízis. Ezeknek mindegyike ismerős a közgazdaságtanból és a pénzügyekből, és lassan alkalmazásra kerülnek a klímatudományban is. Az idősoros elemzési módszerek lehetőséget kínálnak annak meghatározására, hogy a klímaváltozás elsődleges mozgatórugói antropogén vagy természetes tényezők-e, anélkül, hogy klímamodelleket kellene használni, bár kulcsfontosságú kérdések továbbra is tisztázatlanok (pl. Dergiades et al., 2016, Balcombe et al., 2019, Dagsvik et al., 2020, Razzak, 2022, Dagsvik és Moen, 2023).

A „Granger-oksági" modellezés az együtt mozgó adatsorok befolyásolási irányainak meghatározására alkalmas eszköz. Ez egy statisztikai fogalom, nem fizikai. Ha egy változó aktuális értékének ismerete jelentősen javítja egy másik változó előrejelzésének pontosságát, ebből oksági összefüggésre következtethetünk; ezt Granger-oksági viszonynak nevezzük. A modellező eszközök, az úgynevezett vektor autoregresszió, közvetlen impulzus-válasz mintázatokat és visszacsatolásokat mér. A jól ismert Vosztok jégmagadatokra történő alkalmazás hibát tárt fel Al Gore *Kellemetlen igazság* című dokumentumfilmjében. Gore bemutatta az adatokat, és felhívta a figyelmet a hőmérséklet és a CO_2 változás közötti koherenciára egy 440 000 éves időszak folyamán, amelyről Gore azt állította, hogy a hőmérséklet-változásokat a CO_2 okozza. A hőmérséklet-változások azonban befolyásolhatják a légköri CO_2-szintet. Davidson et al. (2015) megvizsgálta az idősorokat, és az derült ki, hogy a CO_2-

nek Granger-oka hőmérséklet, de fordítva ez nem áll fenn. Más szóval, a Vosztok-adatokban ábrázolt időléptékekben a sorozat koherenciája elsősorban a hőmérséklet CO_2-szintre gyakorolt hatásának a következménye, nem pedig a CO_2-szint hőmérsékletre gyakorolt visszacsatolásé.

Összefoglalva, az éghajlati adatok ok-okozati összefüggéseinek két elsődleges statisztikai módszerei: az optimális ujjlenyomatvétel és az idősoros elemzés. Az attribúciós szakirodalomban Allen és Tett (1999) optimális ujjlenyomatvételi módszerének alkalmazásai dominálnak, és ezzel alátámaszthatók voltak a korábbi IPCC-következtetések. Az eredmények azonban függenek az éghajlati modellek pontosságától, és a módszer közelmúltbeli bírálatok szerint „eredendően elfogult". Az idősoros módszerek nem függenek az éghajlati modellektől, de saját feltételezéseket igényelnek, és olyan eredményeket generáltak, amelyek eddig egyáltalán nem konvergáltak konszenzus felé.

8.4 Csökkenő bolygó-albedó és a legutóbbi rekordmelegedés

A globális átlaghőmérséklet hirtelen emelkedése előtérbe állította az éghajlat rövid távú mozgatórugóinak kérdését. Az egyik ilyen jelölt az elnyelt napsugárzás aránya, amely az elmúlt években szintén hirtelen megnőtt. A kérdés az, hogy a változás az üvegházgázok okozta felmelegedés belső visszacsatolása-e, vagy valami más növelte az elnyelt sugárzás arányát, amely aztán a közelmúltbeli felmelegedést okozta.

A bolygó-albedó a bejövő napsugárzás azon részaránya, amely visszaverődik az űrbe, ahelyett, hogy azt a bolygó elnyelné. E tekintetben az erősen fényvisszaverő felületek: a felhők teteje, valamint a hó és a jég a legfontosabbak. A Föld albedója körülbelül 30 százalék, ami azt jelenti, hogy a Földet elérő napfény közel egyharmada közvetlenül visszaverődik az űrbe. Az alacsonyabb albedó azt jelenti, hogy a bolygó több napenergiát nyel el, amit aztán hőként sugároz vissza. Ezért, ha minden más tényező változatlan, a bolygó albedójának csökkenése a Föld felmelegedésével jár.

A Föld éghajlati rendszerében vitathatatlanul a legszembetűnőbb 21. század változás, hogy a bolygó albedója 2015 óta jelentősen csökkent, amely folyamat legalább két éven át egybeesett a rekordot elérő globális melegedés időszakával. A 8.2. ábra a bolygó albedójának 2000 óta bekövetkezett változásait mutatja. (Jó műholdas megfigyelések 2000 óta vannak.) A bolygó albedójának 0,5 százalékos csökkenése 2015 óta az átlagosan elnyelt napsugárzásban 1,7 W/m^2-es növekedésnek felel meg (Hansen és Karecha, 2025). Összehasonlításképpen, Forster et al. (2024) becslése szerint a légköri CO_2-koncentráció az iparosodás előtti időkhöz viszonyított növekedéséből adódó jelenlegi kényszerérték 2,33 W/m^2.

A 2000 előtti, kevésbé megfelelő adatokkal rendelkező időszakra visszatekintve Goessling et al. (2025) értékelése szerint a bolygó albedója viszonylag alacsony volt az 1940-es és 50-es évek körül, mielőtt az ipari aeroszol prekurzor kibocsátásának növekedése az 1980-as évekig megnövelte volna az albedót. A legnagyobb bolygó-albedó-eltéréseket a vulkánkitörések okozta magas albedójú epizódok okozták, például az 1991-es Pinatubo-kitörés után. Bár bizonytalan, de lehetséges, hogy a 2023-as bolygó-albedó-minimum volt legalább 1940 óta a legalacsonyabb albedóérték.

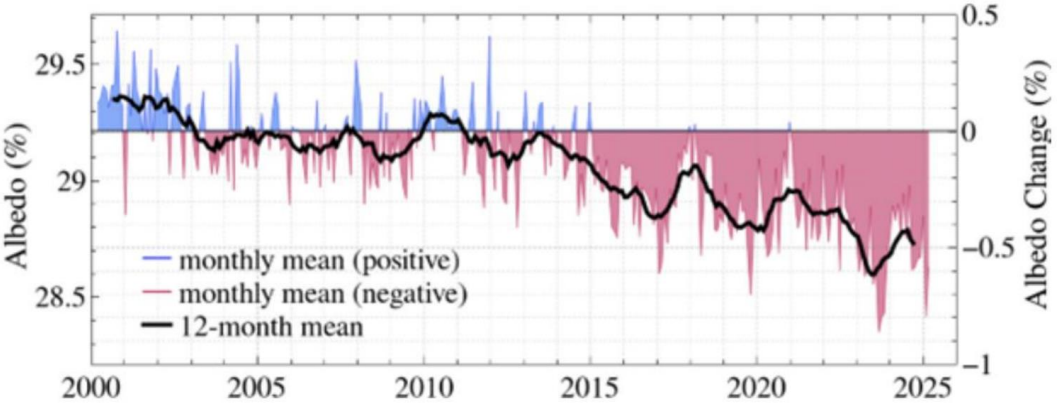
A felszíni jellemzők változásai nem magyarázzák a bolygó-albedó 2015 óta bekövetkezett csökkenését:

- Az északi-sarki tengeri jég kiterjedése 1980 óta körülbelül 5 százalékkal csökkent (https://nsidc.org/data/seaice_index/images/s_plot_hires.png), bár 2007 után az északi-sarki tengeri jég csökkenése szünetelt. (England et al., 2025)

- Az antarktiszi tengeri jéggel kapcsolatban az IPCC AR6 arra a következtetésre jut, hogy „1979 és 2020 között az antarktiszi tengeri jég területén a regionálisan ellentétes trendek és a nagy belső változékonyság miatt nem volt jelentős tendencia." (Összefoglaló a döntéshozók számára, A.1.5)

- Az északi féltekén az éves hótakaró 1967 óta lassan csökken, jelentősnek nem nevezhető tendenciával. Az adatok szerint az északi féltekén havasabb telek vannak, amelyeket tavasszal és nyáron gyorsabb olvadás kísér, lásd: http://climate.rutgers.edu/snowcover/ és 5.6. szakasz.

• A globális zöldülés (2. fejezet) hozzájárul a bolygó albedójának csökkenéséhez, mivel az erdők albedója alacsonyabb, mint a nyílt területeké vagy a hóé. Léteznek azonban bizonyítékok arra, hogy az erdők megnövelik a felhőzetet (ami erős fényvisszaverő képességet jelent), és ez ellensúlyozza az erdőterület növekedésével járó közvetlen albedócsökkenést.



8.2. ábra: A Föld albedója (fényvisszaverő-képesség, százalékban), az évszakok hatásának eltüntetésével Forrás: Hansen és Karecha (2025)

A felszíni fényvisszaverő képesség változásai hozzájárulnak a bolygó albedójának kismértékű, lassú csökkenéséhez. Ezek a változások azonban nem magyarázzák a bolygó albedójának 2015-ben kezdődő meredek csökkenését. Továbbá a felszíni albedó bármilyen változása átlagosan körülbelül háromszoros faktorral csillapodik, mindenekelőtt a felhőtakaró miatt (Loeb et al. 2019). A felszín albedóváltozása így csak gyenge hozzájárulást jelent a közelmúltbeli bolygóléptékű albedócsökkenésben, különösen, ami az éves átlagot és a globális értéket illeti. Ezért a legvalószínűbb magyarázatot a meredek albedócsökkenésre a légköri aeroszolok és/vagy a felhők változásai adják.

Az aeroszolok a légkörben található apró részecskék, amelyek visszaverik a napfényt, és kölcsönhatásba léphetnek a felhőfolyamatokkal, hogy a felhők fényvisszaverőbbek legyenek. Az aeroszolok lehetnek természetes eredetűek (pl. talajból, tüzekből származó por), valamint emberi eredetűek: égetésből származók (beleértve a fosszilis tüzelőanyagokat is). Azok a régiók, amelyek zöldülnek és/vagy ahol megnő a csapadékmennyiség, kevesebb port termelhetnek. Az antropogén aeroszolok esetében három szakaszban, 2010-ben, 2015-ben és 2020-ban vezettek be új, a kénkibocsátás csökkentését célzó hajóüzemanyag-szabályozást. A szulfátrészecskék visszaverik a napsugárzást, így a tisztább levegő azt jelenti, hogy kevesebb napsugárzás verődik vissza, ami hozzájárul a felszín felmelegedéséhez. A szulfátaeroszolok közvetett hatásai közé tartozik, hogy a szubtrópusokon megnő az alacsonyszintű felhők fényvisszaverő képessége. Vita övezi, hogy e szulfátkibocsátás változása mennyire jelentős a Föld sugárzási egyensúlyában (Hodnebrog et al., 2024; Yuan et al., 2024), de a főbb hajózási útvonalakra bevezetett korlátozás kismértékű globális hatásra utal (Schmidt, 2024).

A globális albedó 2015 óta tartó csökkenésére mindenekelőtt a felhők változásai adhatnak magyarázatot. A felhők tulajdonságainak közelmúltbeli változásaival két újabb tanulmány (Loeb et al., 2024; Goessling et al., 2024) is foglalkozott. Műholdas és újrafeldolgozási adatok figyelembevételével Loeb et al. megállapította, hogy az északi féltekén a bolygóalbedó csökkenésének fő oka az alacsony és a közepes szintű felhők 2015 óta tartó csökkenése, míg a déli féltekén a bolygó-albedó csökkenése elsősorban a közepes szintű felhők csökkenésének tudható be az összes földrajzi szélességi zónában. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a felhőanomáliák főként az alacsonyszintű felhők csökkenésének tudhatók be. Az elmúlt évtizedben koherens alacsonyszintű felhőzet-csökkenéssel rendelkező régiók közé tartozik az Óceánia (Gél-kelet-Ázsia, „Maritime Continent) körüli meleg medence régió és az északi extratrópusi nyugati Csendes-óceán, valamint az

Atlanti-óceán és a szomszédos szárazföldi régiók nagy része. Az ezekben az elemzésekben 2015 óta azonosított globális felhőzet-csökkenés 1-2 százalék.

A kérdés ezt követően az, hogy vajon mi a felhőzetváltozás oka. Az elmúlt évtizedben a csökkenő felhőzetre két magyarázat született:

- Természetes éghajlati változékonyság.
- Az alacsonyszintű felhőzet változása a tengerfelszín-hőmérséklet emelkedésével van összefüggésben, ami a klímaváltozásra adott pozitív visszacsatolás kialakulására utal (Hansen és Karecha, 2025).

Nem könnyű igazolni egy 2015-ben kezdődött új pozitív alacsonyfelhőzet-visszacsatolást, mivel nincs akkoriban fellépő egyértelmű oka, ami visszacsatolást váltott volna ki. Ebben az időszakban azonban számos természetes éghajlati jel van, amely a légköri cirkuláció változásaihoz kapcsolódik, és befolyásolhatja a felhők eloszlását:

- A 2014-2016-os időszak volt az egyik legerősebb El Niño esemény, amit valaha feljegyeztek.
- A 2015-ben kezdődő hideg anomália az Atlanti-óceán északi szubpoláris örvényében az óceáni cirkulációs mintázat eltolódását tükrözi, ami az Atlanti-óceán évtizedes változékonyságával jár. (Frajka-Williams et al., 2017; Arthun et al. 2021).
- A Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció (PDO) pozitív indexe 2016-ban tetőzött, majd csökkent, és 2019 vége óta a negatív tartományban van.
- A tengeralatti Hunga-Tonga vulkán kitörése 2022-ben.

Az El Niño Déli Oszcillációhoz (ENSO) kapcsolódó évközi felhőanomáliák jelentős globális jellel és erős regionális jellel rendelkeznek, különösen a trópusi Indiai- és Csendes-óceán felett.

A Hunga Tonga kitörése figyelemre méltó, mivel egybeesik a 2023-as kivételesen alacsony bolygó-albedó értékkel. Goessling et al. (2024) megállapította, hogy a 2023-as felhőperturbációk a 2015 óta megfigyelt általános mintázattól eltérő mintázatot mutattak, a felhőzetcsökkenés az északi féltekén és a trópusokon volt a legkifejezettebb. A felhőzet regionális csökkenése a legkifejezettebb az Indiai-óceán keleti részén, Dél-Amerikában és a Csendes-óceán keleti részén, valamint Észak-Amerika északi részén, a Déli-óceánon a 60° déli földrajzi szélesség körül, a szubtrópusi és keleti Észak-Atlanti-óceánban, valamint az Észak-Csendes-óceán egyes részein volt.

A Hunga Tonga kitörése szokatlan volt, mivel szulfátrészecskék mellett nagy mennyiségű vízgőz jutott a sztratoszférába. Az első publikációk a sztratoszférikus cirkulációra gyakorolt hatásokra és a közvetlen sugárzási hatásra összpontosítottak. 2025-ben olyan tanulmányok jelennek meg, amelyek a Hunga Tonga felszíni éghajlatra gyakorolt közvetett hatásait földrendszer-modellekből származó együttes szimulációk segítségével vizsgálják (Bednarz et al., 2025; Kuchar et al., 2025). E tanulmányok statisztikailag szignifikáns hatásokat találtak a regionális éghajlatra. E hatásokat a sztratoszféra-troposzféra kapcsolatokból eredő cirkulációs változások okozták. A fenti tanulmányok a vulkáni tevékenység és az éghajlati dinamika közötti összetett kölcsönhatásokra utalnak. A Hunga Tonga-kitörés bolygó-albedóra gyakorolt hatásainak kibogozásához további kutatásokra van szükség.

Összefoglalva, a bolygó-albedó csökkenése és a felhőzet egyidejű csökkenése előtérbe állítja a felhők és a felhőváltozások jelentős szerepét a globális éghajlati változékonyságban, valamint a klímaváltozásban. A globális felhőzet 1-2 százalékos változása nagyobb sugárzási hatással van az éghajlatra, mint amekkora a CO_2 megduplázódásának közvetlen sugárzási hatása. Bár nehéz kibogozni a közelmúltbeli trend okait, a csökkenő felhőzet okára vonatkozó versengő magyarázatok jelentős következményekkel járnak az egyensúlyi klímaérzékenység kiértékelése és a közelmúltbeli felmelegedés okaként való értelmezése szempontjából. További 10 évnyi adat segíthet tisztázni, hogy ez a felmelegedéssel összefüggő erős pozitív felhő-visszacsatolás-e, vagy a természetes változékonyság által vezérelt átmeneti ingadozás.

8.5 Az éghajlati hatótényezőkre vonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC (Ranasinghe et al. 2021) az „éghajlati hatások mozgatórugóit” vagy CID-eket (Climate Impact Driver) úgy határozza meg, mint „a társadalom vagy az ökoszisztémák valamely elemét befolyásoló fizikai éghajlati rendszerfeltételeket (pl. eszközök, események, szélsőségek)”. Ezért a CID-ek az időjárási és az éghajlati rendszer azon jellemzői, amelyek az éghajlatváltozás hatásainak felmérésében elsődlegesen érdekesek, mivel potenciális hatással vannak az emberekre és a természeti világra. Például a „Hő és hideg” címszó alatt a CID-eket az átlagos levegőhőmérséklet, a szélsőséges hőség, a hideg időszakok és a fagy jelenti. Az IPCC azt is kiemeli, hogy a CID-ek nem feltétlenül károsak: a szóban forgó rendszertől függően lehetnek károsak, semlegesek, előnyösek vagy mindezek kombinációi.

Ranasinghe et al. (2021, 1856. o.) 12.12. táblázatának első oszlopai, amelyeket itt 8.1. táblázatként közlünk, összefoglalják az AR6 értékelését arról, hogy vajon az összes főbb időjárási tényezőben megjelent-e az antropogén hatás jele. A fejezet egyik témája, hogy az IPCC által használt attribúciós módszerek hajlamosak túlbecsülni az antropogén hatást, és alábecsülni a természetes változékonyság szerepét. Mindazonáltal az összefoglaló táblázat egyik feltűnő jellemzője, hogy milyen kevés időjárási tényező mutat olyan antropogén jelet, amely megkülönbözteti őket a természetes változékonyságtól.

A felsorolt 33 időjárási hatáskategória közül csak ötben állítanak *nagy megbízhatósággal* antropogén jelet, további négyben pedig *közepes megbízhatósággal*. (Megjegyzendő, hogy a CID-ek egyike maga a CO_2-szint emelkedése, és mivel ezt a megnövekedett CO_2-szintnek tulajdonítani szószaporítás (autológia), e CID figyelmen kívül hagyható.) A többi esetben az IPCC nem állítja, hogy antropogén tényezőket észlelt volna. Az öt *nagy megbízhatóságú* állítás közül kettő az átlaghőmérséklet (a legköri és óceáni) változásaira vonatkozik, ezek tehát nem a szélsőséges időjárás mértékei. Továbbá a négy *közepes megbízhatóságú* állítás közül kettő az óceánkémiai összetételhez kapcsolódik, azaz szintén nem a szélsőséges időjáráshoz. Az IPCC nem tart számon emberi befolyást számos nem hőmérsékleti időjárási jellemzőben, mint például a szél, a csapadék, az árvizek vagy az aszály.

Az IPCC 12.12. táblázatának egyéb oszlopai arról számolnak be, hogy ebben az évszázadban az RCP8.5 (a legszélsőségesebb kényszerítő forgatókönyv) szerint várhatóan antropogén jelek jelennek meg. Ezeket az oszlopokat több okból is kihagytuk. Először is, mert arra vonatkoznak, hogy a klímamodellek fognak-e kimutatható jeleket kivetíteni a megfigyelésekre, ami egészen más kérdés, mint amivel itt foglalkozunk: hogy mutattak-e ki jelet a történelmi adatokban. Másodszor, ahogy a 4. fejezetben tárgyaljuk, az RCP8.5 forgatókönyv egy félrevezető és valószínűtlen, szélsőséges történetszál, nem „alapeset” vagy szokásos üzletmenet-előrejelzés. Harmadszor, a részletes modellek együtteséről elismerik (Palmer és Stevens 2019), hogy „nem alkalmas a célra”, azaz a regionális változások leírására, és „nem képes a jövőbeli feltételeket olyan térbeli, időbeli és valószínűségi pontossággal ábrázolni, amellyel az előrejelzéseket gyakran készítik” (Nissan et al., 2019). Ezekkel a kikötésekkel együtt is megjegyezzük, hogy az AR6 12.12. táblázatának kihagyott oszlopai azt mutatják, hogy a legtöbb időjárási hatás a század végéig várhatóan nem mutat antropogén jelet.

Amint azt a 6. fejezetben tárgyaltuk, a szélsőséges időjárási rendszerek mintázataiban a természetes változékonyság dominál, és a trendészlelésre vonatkozó leegyszerűsített állításokat gyakran ássa alá a regionális heterogenitás és a trendek időbeli megfordulása. A 8.1. táblázat arra a kapcsolódó pontra mutat rá, hogy a legtöbb szélsőséges időjárási típus változásait jelenleg nem lehet emberi hatásoknak tulajdonítani. A szelet példaként véve az IPCC azt állítja, hogy az átlagos szélsebességekben, heves szélviharokban, trópusi ciklonokban vagy homok- és porviharokban nem jelent meg antropogén jel, és még szélsőséges kibocsátási forgatókönyv esetén sem várható ilyen ebben az évszázadban. Ugyanez vonatkozik az aszályra és a tűzesetekre is.

Climatic Impact-driver Type	Climatic Impact-driver Category	Already Emerged in Historical Period
Heat and Cold	Mean air temperature	1
	Extreme heat	2
	Cold spell	4
	Frost	
Wet and Dry	Mean precipitation	
	River flood	
	Heavy precipitation and pluvial flood	
	Landslide	
	Aridity	
	Hydrological drought	
	Agricultural and ecological drought	
	Fire weather	
Wind	Mean wind speed	
	Severe wind storm	
	Tropical cyclone	
	Sand and dust storm	
Snow and Ice	Snow, glacier and ice sheet	
	Permafrost	
	Lake, river and sea ice	11
	Heavy snowfall and ice storm	
	Hail	
	Snow avalanche	
Coastal	Relative sea level	
	Coastal flood	
	Coastal erosion	
Open Ocean	Mean ocean temperature	
	Marine heatwave	
	Ocean acidity	
	Ocean salinity	13
	Dissolved oxygen	14
Other	Air pollution weather	
	Atmospheric CO_2 at surface	
	Radiation at surface	

High confidence of decrease | Medium confidence of decrease | Low confidence in direction of change | Medium confidence of increase | High confidence of increase

8.1. táblázat: Az IPCC AR6 I. munkacsoportjának jelentéséből a 12.12. táblázat 1. oszlopának reprodukciója. Antropogén jel megjelenése a történelmi időszakban a bemutatott CID-ek esetében. Fehér: nincs észlelt jel. Kék és narancssárga: az észlelt változás (csökkenés vagy növekedés), valamint a színes jelmagyarázatban jelzett megbízhatósági szint. A számok adott régiókra és megbízhatósági szintekre utalnak: a megjegyzéseket lásd az eredeti táblázatban.

8.6 Szélsőséges eseményekre (EEA) vonatkozó oktulajdonítás

Az IPCC szélsőséges időjárási és éghajlati események attribúciója (oktulajdonítása, Extreme Event Attribution) általánosabb vizsgálata során az AR6 homályos értelmű értékelést ad az antropogén felmelegedés szerepéről, a különféle fejezetekben eltérő értelmezést szerepeltet. A WG1 11. fejezete kimondja (Seneviratne et al., 2021):

> A szélsőségek megfigyelt változásainak bizonyítékai és azok emberi befolyásnak való oktulajdonítása (beleértve az üvegházhatású gázok és aeroszolok kibocsátását, valamint a földhasználat változásait) az AR5 óta megerősödött, különösen a szélsőséges csapadék, az aszályok, a trópusi ciklonok és az összetett szélsőségek (így a száraz/forró események és a tűzesetek) esetében. Néhány közelmúltbeli forró szélsőséges esemény rendkívül valószínűtlen lett volna az éghajlati rendszerre gyakorolt emberi befolyás nélkül.

Ezzel szemben, ahogy a 8.5. szakaszban is megjegyeztük, a WG1 12. fejezete (12.12. táblázat) más képet fest – feltehetően a két fejezethez tartozó különböző szerzőcsoportok szakértői eltérő következtetésekre jutottak (Ranasinghe, 2021):

> • Nagy valószínűséggel növekszik a szélsőséges hőség eseményszáma a trópusi régióban, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést, és a közepes földrajzi szélességek legtöbb régiójában, valamint közepes valószínűséggel máshol.
>
> • Közepes valószínűséggel csökken a szélsőséges hideg eseményszám Ausztráliában, Afrikában és Dél-Amerika északi részének nagy részén, ahol a megfigyelések lehetővé teszik a trendbecslést.
>
> • Nincs bizonyíték arra, hogy a történelmi időszakban megváltozott volna a folyók áradása, a heves csapadék, az aszály, a tűzesetek, a heves szélviharok és a trópusi ciklonok előfordulása.

Bár a szélsőséges időjárási eseményekben bekövetkező változások észlelésének és azok oktulajdonításának általános kérdése továbbra sem egyértelmű, az ezen a területen végzett tevékenységek nagy része az egyes szélsőséges időjárási események oktulajdonítására vonatkozik. A szélsőséges események oktulajdonításával kapcsolatos legnagyobb erőfeszítést a World Weather Attribution (WWA; worldweatherattribution.org), egy nemzetközi kutatási kezdeményezés fejti ki. Céljuk annak elemzése, hogy az éghajlatváltozás hogyan befolyásolja a szélsőséges időjárási események valószínűségét és intenzitását. Megközelítésük az, hogy regionális klímamodellek nagyméretű együtteseit használják fel arra, hogy összehasonlítsák a mai éghajlaton bekövetkező eseményeket egy iparosodás előtti, emberi befolyás nélküli ellentmondásos (kontrafaktuális) éghajlaton bekövetkező eseményekkel.

A WWA kiemelkedő nyilvános jelenlétet tanúsít a szélsőséges időjárás és az éghajlatváltozás közötti kapcsolat terén, sajtóközleményei a nyilvános és politikai vitákban jelentős figyelmet kapnak. A WWA lektorálatlan eredményeinek széles körű népszerűsítése, a peres eljárásokban hasznosítható elemzések alakításának nyílt elismerése, valamint módszertani kihívásai azonban vitákat váltottak ki, a kritikusok pedig megkérdőjelezik következtetéseik megalapozottságát és pártatlanságát (Pielke Jr. 2024). Ezen problémák ellenére a WWA munkája továbbra is befolyásolja az éghajlattudományi és médiabeli narratívákat. A megközelítéssel kapcsolatos technikai kritikák közé tartozik a formális észlelési folyamat hiánya; az a hallgatólagos feltételezés, hogy az ipari forradalom utáni felmelegedés 100 százalékát üvegházhatású gázok okozzák; valamint a belső éghajlati változékonyság megfelelő figyelembevételének elmulasztása.

Mivel az EEA témaköre viszonylag új, a szakértői szakirodalomban számos alapvető módszertani kérdés még nem rendeződött. Fontos kihívást jelent az adatok hiánya. A szélsőséges események ugyanis definíció szerint ritkák. Számos, szélsőséges eseménytípusokat elemző vizsgálat

(beleértve az Egyesült Államok Nemzeti Értékelő Jelentéseit is) csak az 1950 vagy az 1970 óta gyűjtött adatokat értékeli. Azonban, ahogyan a 6. fejezetben is hangsúlyoztuk, az Egyesült Államok történelmének számos legsúlyosabb szélsőséges időjárási és éghajlati eseménye a 20. század első felében vagy azt megelőzően (pl. a 19. század elején) történt. És ha paleoklíma-rekonstrukciókat veszünk figyelembe, nagyon nehézzé válik egy esemény számára, hogy átlépje a természetes változékonyságtól elvárható akármekkora küszöbértékeket, különösen, ha egy ésszerű méretű földrajzi régiót veszünk figyelembe.

Egy másik kihívás a vizsgált esemény meghatározása. A statisztikában és az ökonometriában régóta létezik olyan szakirodalom, amely a kiugró értékeket tartalmazó adatok elemzésének kihívásairól szól. A probléma azért merül fel, mert egy adatsor egy valószínűségi eloszlást hoz létre, amely meghatározza a megfigyelések várható tartományát. Ha kiugró értéket figyelünk meg, az arra utalhat, hogy az adateloszlást kiváltó mögöttes folyamat megváltozott (ami az időjárási kontextusban azt jelentené, hogy éghajlatváltozást észleltek), vagy hogy az mögöttes folyamatnak több állapota van, amelyek mindegyikének eltérő a valószínűségi eloszlása, ebben az esetben egy kiugró érték megfigyelése egyszerűen azt jelenti, hogy átmenetileg egy másik állapotban voltunk, de maga a rendszer változatlan maradt. Ha egy idősor csak egyetlen kiugró eseményt tartalmaz a sorozat végén, akkor nem lehet meghatározni, hogy melyik modell a helyes (Chen és Liu 1993). Például létezhet egy „szokásos" időjárási állapot, amely egy adott tengerparti régióban a nyári nappali maximumok eloszlását eredményezi, és egy második, ún. „hőhullám"-állapot, amely akkor lép be, amikor egy szárazföldi blokkoló esemény következik be, ami 15°C-kal magasabb középhőmérséklet-eloszlást eredményez, mint az első. Egy olyan nap, amelynek hőmérséklete 13°C-kal magasabb a normálisnál, vagy extrém hőanomália lenne az első állapotban, vagy némileg hűvös esemény a másodikban, és ebben az esetben statisztikai alapon nincs mód arra, hogy megtudjuk, melyik nézet a helyes.

Visser és Petersen (2012), valamint Sardeshmukh et al. (2015) is rámutatnak, hogy egymástól eltérő eloszlások egyformán jól illeszkedhetnek a megfigyelt adatokhoz, de egy adott időjárási esemény valószínűségére vonatkozóan nagyon eltérő következményekkel járhatnak. Visser és Petersen azzal érvelnek, hogy a szélsőséges időjárási elemzések mély bizonytalanságaira való tekintettel kerülni kell az egyes események és a globális klímaváltozás közötti összefüggés megállapítását. Továbbá, egyetlen kiugró érték léte egy adatsor végén felveti azt a problémát, hogy az események valószínűségének becslése torzított lesz, függetlenül attól, hogy a kiugró értéket belefoglaljuk-e vagy sem (Barlow et al., 2020). Az torzítás kiküszöbölésére szolgáló módszereket még nem dolgozták ki, ami arra késztette egyes szakértőket (pl. Miralles és Davison 2023), hogy azt állítsák, hogy olyan helyzetekben, ahol egy adatsor egyetlen szélsőséges eseményt tartalmaz a végén, a szélsőséges esemény visszatérési időszakának becslése annyira torzított és bizonytalan lesz, hogy azt teljesen el kell kerülni. Egy esettanulmányt közlünk egy nemrégiben az Egyesült Államokban lezajlott, nagy hatású szélsőséges eseményről, hogy bemutassuk azokat a kihívásokat és kétértelműségeket, amelyekkel a szélsőséges időjárási események gyakoriságának és intenzitásának az antropogén felmelegedésnek való hozzárendelése (oktalajdonítása) jár.

8.6.1 Esettanulmány – a 2021-es hőhullám Észak-Amerika nyugati részén

Észak-Amerika nyugati felén 2021-ben bekövetkezett hőhullám egy szélsőséges esemény volt, amely 2021 júniusának végén a térség nagy részét érintette. Felszínhőmérséklet-rekordok dőltek meg Portlandben, Oregonban (41°C; korábbi rekord 40°C) és Seattle-ben, Washingtonban (40°C; korábbi rekord 40°C) (Mass et al., 2024).

A WWA csapata elemzésével nemzetközi címlapokra került, amely a következő attribúciós állításokat tartalmazta (WWA, 2021; Philip et al., 2022):

- Megfigyelések és modellezés alapján ennek a hőhullámnak a bekövetkezése gyakorlatilag lehetetlen lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.
- A becslések szerint a mai éghajlaton az esemény előfordulása körülbelül 1000 évente egy.

• Az esemény legalább 150-szer ritkább lett volna ember okozta klímaváltozás nélkül.

• E hőhullám körülbelül 2°C-kal melegebb volt, mint amilyen az ipari forradalom kezdetén lett volna (amikor a globális átlaghőmérséklet 1,2°C-kal hidegebb volt, mint ma).

Az első állítás fontos ellentmondása azonban az, hogy más kutatók a történelmi időjárási adatokból arra a következtetésre jutottak, hogy bár a megfigyelt nagyságrendű hőhullám gyakorlatilag lehetetlen antropogén klímaváltozás nélkül, *természetes klímaváltozás esetén is* gyakorlatilag lehetetlen. Bercos-Hickey (2022) megjegyezte, hogy „ezek a hőmérsékletek gyakorlatilag lehetetlenek voltak bármilyen korábban tapasztalt meteorológiai körülmény között, globális felmelegedéssel vagy anélkül". McKinnon és Simpson (2022) kijelentették, hogy „a legvalószínűbb magyarázat továbbra is az, hogy az időjárási esemény maga volt a 'balszerencse'." A 2023-as oregoni klímaértékelés (Fleischman, 2023) arra a következtetésre jutott, hogy a hőkupola klímaváltozás nélkül is kialakult volna, és „nincs bizonyíték arra, hogy a hőkupolát előidéző időjárási jellemzők rendkívül szokatlan kombinációját a klímaváltozás valószínűbbé tette volna, továbbá a klímamodellek nem vetítik előre a magasnyomású hátságok gyakoriságának növekedését a Csendes-óceán északnyugati részén" (Fleischman, 2023, 49. o.).

Mass et al. (2024) összesítik a hőhullámhoz vezető összetett események közelítő sorrendjét. A troposzféra középső részén rekordmagasságú hátság húzódott a Csendes-óceán északnyugati térségében, amit a nyugati Csendes-óceánban zajló trópusi zavar kényszerített ki. Ez rekordmagas közép-troposzférabeli hőmérsékleteket, az alsó légkörben erős süllyedést, alacsonyszintű keleti áramlást okozott, amely a regionális terepen lefelé irányuló felmelegedést és a hűvösebb tengeri levegő eltávolítását eredményezte, valamint egy közeledő alacsony szintű vályút, amely fokozta a lefelé irányuló áramlást. Az esemény a maximális napsugárzás és a normálisnál szárazabb talajnedvesség idején történt. Egy történetszálas megközelítést alkalmazva Mass et al. úgy értékelte, hogy a Csendes-óceán északnyugati részén nem volt megfigyelhető aszály és talajszáradási tendencia; nincs bizonyíték arra, hogy a globális felmelegedés erősebb magasnyomású gerinceket eredményezne, és nem figyeltek meg hőhullám- vagy rekordhőmérséklet-tendenciáját a régióban. Arra a következtetésre jutottak, hogy bár az antropogén felmelegedés akár 2°F-kal is hozzájárulhatott az esemény nagyságrendjéhez, kevés bizonyíték van arra, hogy az üvegházhatású gázok növekedése tovább erősítette volna az eseményt.

Bercos-Hickey et al. (2022) statisztikai elemzést végzett a hőhullám modellalapú attribúciós vizsgálatáról. Mivel az esemény nagyon kiugró érték, és messze meghaladja a történelmi adatokból illesztett általánosított szélsőérték-eloszlások határait, arra a következtetésre jutottak, hogy a visszatérési időkre, az esemény nagyságának és gyakoriságának mennyiségi változásaira, valamint a szélsőséges hőmérsékletek valószínűségére vonatkozó becslések, amelyeket a WWA szolgáltatott, nem pontosak, és alacsony megbízhatóságúnak kell értelmezni őket. Azt találták, hogy a regionális éghajlati modellek együttesét használó utólagos attribúciós módszerek, kombinálva Pearl (2009) ok-okozati következtetéseivel, korlátozott és feltételes információkat képesek szolgáltatni az emberi befolyás nagyságrendjéről erre a hőhullámra – egy szigorúbb becslést adtak, miszerint az emberi tevékenységek ~1,4–1,8 °F-os növekedést okoztak a napi maximumhőmérsékletekben.

Zeder et al. (2023) szintén arra a következtetésre jutott, hogy a Philip et al. (2022, a WWA elemzése) által alkalmazott módszerek hajlamosak eltúlozni a szélsőséges hőhullámok ritkaságát, ami a klímaváltozás hőhullám-eseményre gyakorolt hatásának elfogult észleléséhez vezet: „A megfigyelt szélsőséges hőhullám-események visszatérési időszakának túlbecslésére való hajlam azt a benyomást táplálhatja, hogy a látszólag lehetetlen hőhullám-szélsőségek jelenleg példátlan ütemben csoportosulnak."

A 2021-es hőhullám egy ritka és példa nélküli összetett időjárási esemény volt, amely akár 9°F-kal is megdöntötte az évszázados hőmérsékleti rekordokat. Míg a WWA-csapat világszerte nyilvánosságot kapott az antropogén klímaváltozást okoló gyors állításai közzétételéhez, a későbbi

lektorált elemzések kimutatták, hogy az eseményt ritka meteorológiai körülmények okozták, amelyeket a globális felmelegedés nem tett valószínűbbé.

Hivatkozások

Allen, M. R., & Tett, S. F. B. (1999). Checking for model consistency in optimal fingerprinting. Climate Dynamics, 15(6), 419–434. https://doi.org/10.1007/s003820050291

AR4: Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

AR5: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

Arthun, M, RCJ Willis, HL Johnson, L Chafik, HR Langehaug (2021) Mechanisms of Decadal North Atlantic Climate Variability and Implications for the Recent Cold Anomaly. Journal of Climate, Vol 34

Balcombe, Kevin, Iain Fraser and Abhijit Sharma (2019) Is radiative forcing cointegrated with temperature? A further examination using a structural time series approach." Management of Environmental Quality 30(5) DOI 10.1108/MEQ-12-2018-021.

Barlow, Anna Maria, Chris Sherlock and Jonathan Tawn (2020) Inference for Extreme Values Under Threshold-Based Stopping Rules. Journal of the Royal Statistical Society Series C August 2020, Pages 765–789, https://doi.org/10.1111/rssc.12420

Bednarz, EW, AH Butler, X Wang, Z Zhou, W Yu, G Stenchikov, M Toohey, Y Zhu (2025) Indirect climate impacts of the Hunga eruption. Preprint, https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1970

Bercos-Hickey, E., et al. (2022). Anthropogenic contributions to the 2021 Pacific Northwest heatwave. Geophysical Research Letters, 49(23), e2022GL099396. https://doi.org/10.1029/2022GL099396

Bokuchava, DD and VV Semenov (2021) Mechanisms of the early 20th century warming in the Arctic. Earth-Science Reviews, 222, 103820

Chatzistergos, T., Krivova, N. A., & Yeo, K. L. (2023). Long-term changes in solar activity and irradiance. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 252, 106150. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150

Chen, C., & Liu, L.-M. (1993). Joint estimation of model parameters and outlier effects in time series. Journal of the American Statistical Association, 88(421), 284–297. http://www.jstor.org/stable/2290724

Chen, H, SX Chen and M Mu (2023) A statistical review on the optimal fingerprinting approach in climate change studies. Climate Dynamics 62:1439-1446 https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06975-5

Chylek, P., et al. (2016). The role of Atlantic Multi-Decadal Oscillation in the global mean temperature variability. Climate Dynamics, 47(9–10), 3271–3279. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3025-7

Connolly, R., et al. (2021). How much has the sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. Research in Astronomy and Astrophysics, 21(6), 131. https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/131

Cramer, W., et al. (2014). Detection and attribution of observed impacts. In C. B. Field et al. (Eds.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects (pp. 979–1037). Cambridge University Press.

Dagsvik, JK SH Moen (2023) To what extent are temperature levels changing due to greenhouse gas emissions? Statistics Norway Discussion Paper 1007 September 2023

Dagsvik, JK, M Fortuna and SH Moen (2020) How Does Temperature Vary Over Time?: Evidence on the Stationary and Fractal Nature of Temperature Fluctuations. Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society, Volume 183, Issue 3, June 2020, Pages 883–908, https://doi.org/10.1111/rssa.12557

Davidson, James E.H., David B. Stephenson and Alemtsehai A. Turasie (2015) Time series modeling of paleoclimate data Environmetrics 27(1) https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/env.2373

Dergiades, T., R.K. Kaufmann and T. Panagiotidis (2016). Long-run changes in radiative forcing and surface temperature: The effect of human activity over the last five centuries. Journal of Environmental Economics and Management 76:67—85. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069615000911

England, Mark, Lorenzo M Polvani, James A Screen, et al (2025). Surprising, but not unexpected, multi-decadal pause in Arctic sea ice loss. ESS Open Archive. March 29, 2025.

Fleishman, E., editor. (2023). Sixth Oregon Climate Assessment. Oregon Climate Change Research Institute, Oregon State University, Corvallis, Oregon. https://blogs.oregonstate.edu/occri/oregon-climate-assessments

Forster et al. (2024) "Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence" Earth System Science Data 17(6) https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025

Frajka-Williams, E, C Beaulieu, Aurelie Duchez (2017) Emerging negative Atlantic Multidecadal Oscillation index in spite of warm subtropics. Scientific Reports, 7:11224

Goessling, Helge F. Thomas Rackow and Thomas Jung (2024) Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. Science Vol 387, Issue 6729 pp. 68-73 https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.adq7280

Gulev, S. K., et al. (2021). Changing state of the climate system. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 287–422). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Hansen J and P Karecha (2025) Large cloud feedback confirms high sensitivity. https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf

Hegerl, G. C., et al. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 663–745). Cambridge University Press.

Hegerl, GC, S Bronniman, A Schurer et al. (2017) Early 20th century warming: Anomalies, causes and consequences. WIRES Climate Change, DOI: 10.1002/wcc.522

Hegerl, GC, S Bronniman, T Cowan (2019) Causes of climate change over the historical record. Environmental Research Letters, 14, 123006

Hodnebrog, Ø et al. (2024), Recent reductions in aerosol emissions have increased Earth's energy imbalance. Communications Earth and Environment 5, 166 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01324-8

Houghton, J. T., et al. (Eds.). (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1–881). Cambridge University Press.

https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity

Kravtsov, S., Westgate, A., & Gavrilov, A. (2024). Global-scale multidecadal variability in climate models and observations, part II: The stadium wave. Climate Dynamics, 62, 10281–10306. https://doi.org/10.1007/s00382-024-07451-4

Kuchar, A., Sukhodolov, T., Chiodo, G., Jörimann, A., Kult-Herdin, J., Rozanov, E., and Rieder, H. H. (2025): Modulation of the northern polar vortex by the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption and the associated surface response, Atmospheric Chemistry and Physics, 25, 3623–3634, https://doi.org/10.5194/acp-25-3623-2025.

Lewis, Nicholas (2023) "Objectively Combining Climate Sensitivity Evidence," Climate Dynamics 61, no. 9–10 (2023): 3155–3163, https://doi.org/10.1007/s00382-022-06398-8 .

Lockwood, M. (2012). Solar influence on global and regional climates. Surveys in Geophysics, 33(3–4), 503–534. https://doi.org/10.1007/s10712-012-9181-3

Loeb, N. G. et al. (2019) Decomposing Shortwave Top-of-Atmosphere and Surface Radiative Flux Variations in Terms of Surface and Atmospheric Contributions. Journal of Climate 32(16), 5003-5019 (2019). doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1

Loeb, N., S-H Ham, RP Allen, TJ Thorsen, B Meyssignac, S Kato, GC Johnson, JL Lyman (2024) Observational Assessment of Changes in Earth's Energy Budget since 2000. Surveys in Geophysics, 45, 1757-1783

Mass, C., et al. (2024). The Pacific Northwest heat wave of 25–30 June 2021: Synoptic/mesoscale conditions and climate perspective. Weather and Forecasting, 39(2), 275–291. https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0154.1

Matthes, K., et al. (2017). Solar forcing for CMIP6 (v3.2). Geoscientific Model Development, 10(6), 2247–2302. https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017

McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? Geophysical Research Letters, 49, e2022GL100380. https://doi.org/10.1029/2022GL100380

McKinnon, K. and I. Simpson (2022) How Unexpected Was the 2021 Pacific Northwest Heatwave? Geophysical Research Letters, 49, e2022GL100380. https://doi.org/10.1029/2022GL100380

McKitrick, R. (2021). Checking for model consistency in optimal fingerprinting: A comment. Climate Dynamics, 58(1–2), 405–411. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05913-7

McKitrick, R. (2023). Total least squares bias in climate fingerprinting regressions with heterogeneous noise variances and correlated explanatory variables. Environmetrics, 35(2), e2835. https://doi.org/10.1002/env.2835

McKitrick, Ross R (2022) On the choice of TLS versus OLS in climate signal detection regression. Climate Dynamics 10.1007/s00382-022-06315-z

McKitrick, Ross R (2025) Consistent Climate Fingerprinting. Climate Dynamics forthcoming preprint available at www.rossmckitrick.com

McLean, J.D., C. R. de Freitas, and R. M. Carter, (2009) "Influence of the Southern Oscillation on Tropospheric Temperature," Journal of Geophysical Research: Atmospheres 114, no. D14 (July 23, 2009): D14104, https://doi.org/10.1029/2008JD011637.

Miralles, Ophélia and Anthony Davison (2023) Timing and spatial selection bias in rapid extreme event attribution. Weather and Climate Extremes 41 100584 https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100584

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, et al (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Nissan, Hannah, Lisa Goddard, Erin Coughlan de Perez, et al. (2019) On the use and misuse of climate change projections in international development. Wires Climate Change 14 March 2019 https://doi.org/10.1002/wcc.579

Palmer, Tim N and Bjorn Stevens (2019) The scientific challenge of understanding and estimating climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 116 (49) 24390-24395 https://doi.org/10.1073/pnas.1906691116

Pearl, J. (2009). Causality. Cambridge University Press.

Philip, S. Y., et al. (2022). Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific coast of the U.S. and Canada June 2021. Earth System Dynamics, 13(4), 1689–1713. https://doi.org/10.5194/esd-13-1689-2022

Pielke Jr., Roger (2024) Weather Attribution Alchemy. Substack essay https://rogerpielkejr.substack.com/p/weather-attribution-alchemy

Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., ... Zaaboul, R. (2021). Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment. In V. Masson-Delmotte et al. (Eds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1767–1926). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.014

Razzak, Weshah A. (2022). "The Econometrics of Global Warming," Journal of Economics and Econometrics, vol. 65(2), pages 13-47.

Sardeshmukh, P. D., Compo, G. P., & Penland, C. (2015). Need for caution in interpreting extreme weather statistics. Journal of Climate, 28(23), 9166–9187. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0020.1

Scafetta, N. (2013). Discussion on climate oscillations: CMIP5 general circulation models versus a semi-empirical harmonic model based on astronomical cycles. Earth-Science Reviews, 126, 321

Scaffeta, Nicola (2021) "Reconstruction of the Interannual to Millennial Scale Patterns of the Global Surface Temperature," Atmosphere 12, no. 2: 147, https://doi.org/10.3390/atmos12020147

Schmidt, G. (2024) Climate models can't explain 2023's huge heat anomaly — we could be in uncharted territory. Nature 627, 467. https://www.nature.com/articles/d41586-024-00816-z

Schmutz, Werner K. (2021) "Changes in the Total Solar Irradiance and Climatic Effects," Journal of Space Weather and Space Climate 11: 40, https://doi.org/10.1051/swsc/2021016.

Seneviratne, S. et al. (2021) "Chapter 11: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate." In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, et al., 1513–1766. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. https://doi.org/10.1017/9781009157896.013.

Solanki, S.K. et al. (2004), "Unusual Activity of the Sun during Recent Decades Compared to the Previous 11,000 Years," Nature 431, no. 7012 (October 28, 2004): 1084–1087, https://doi.org/10.1038/nature02995.

Stefani, Frank (2021) "Solar and Anthropogenic Influences on Climate: Regression Analysis and Tentative Predictions," Climate 9, no. 11 (November 3, 2021): 163, https://doi.org/10.3390/cli9110163.

Thompson, DJW, JM Wallace, JJ Kennedy, PD Jones (2010) An abrupt drop in Northern Hemisphere Sea Surface Temperature around 1970. Nature, 467, 444-447

Tokinaga, H, SP Xie, and H Mukougawa (2017) Early 20th century Arctic warming intensified by Pacific and Atlantic multidecadal variability. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 6227-6233 https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1615880114

Tung, Ka-Kit and Jiansong Zhou (2013) "Using Data to Attribute Episodes of Warming and Cooling in Instrumental Records," Proceedings of the National Academy of Sciences 110, no. 6 (January 23, 2013): 2058–2063, https://doi.org/10.1073/pnas.1212471110.

Usoskin, I.G., S. K. Solanki, and G. A. Kovaltsov (2007) "Grand Minima and Maxima of Solar Activity: New Observational Constraints," Astronomy & Astrophysics 471, no. 1 (June 6, 2007): 301–309, https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077704.

Velasco Herrera, V.M., B. Mendoza, and G. Velasco Herrera (2015) "Reconstruction and Prediction of the Total Solar Irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st Century," New Astronomy 34 (January 2015): 221–233, https://doi.org/10.1016/j.newast.2014.07.009.

Visser, H. and A.C. Petersen (2012) Inferences on weather extremes and weather-related disasters: a review of statistical methods Climates of the Past 8, 265–286 https://cp.copernicus.org/articles/8/265/2012/cp-8-265-2012.pdf

World Weather Attribution (2021) "Western North American Extreme Heat Virtually Impossible without Human-Caused Climate Change." July 7, 2021. https://www.worldweatherattribution.org/western-north-american-extreme-heat-virtually-impossible-without-human-caused-climate-change/.

Yuan, et al. (2024) Abrupt reduction in shipping emission as an inadvertent geoengineering termination shock produces substantial radiative warming. Communications Earth and Environment 5, 281 (2024). doi:10.1038/s43247-024-01442-3

Zeder, J., Sippel, S., Pasche, O. C., Engelke, S., & Fischer, E. M. (2023). The effect of a short observational record on the statistics of temperature extremes. Geophysical Research Letters, 50, e2023GL104090. https://doi.org/10.1029/2023GL104090

III. RÉSZ: HATÁSOK AZ ÖKOSZISZTÉMÁKRA ÉS A TÁRSADALOMRA

9 KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS AZ USA MEZŐGAZDASÁGA

Fejezet-összefoglaló

A legutóbbi évtizedek során számos bizonyíték gyűlt össze arra vonatkozóan, hogy a növekvő CO_2-szint előnyös a növények (így a mezőgazdasági növények) számára, és hogy a CO_2 által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdasága számára összességében előnyös. A légköri CO_2-szint emelkedése az összes főbb amerikai növényfaj termését növelte. Joggal feltételezhető, hogy az éghajlatváltozás összességében semleges vagy előnyös, és az amerikai mezőgazdaság legnagyobb része számára továbbra is az marad.

9.1 Ökonometriai elemzések

Az mezőgazdaságra gyakorolt klímaváltozási hatások ökonometriai elemzésének az a törekvése, hogy a hosszú távú terméshozam-változásokra adott információkat a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra adott válaszként, a gazdálkodók alkalmazkodási viselkedésére vonatkozó feltételezések alapján összegezze. Az egyik módszer a mezőgazdasági földterületek értékváltozásaira összpontosít. Az indoklás az, hogy ha az éghajlatváltozás hosszú távú nettó előny a mezőgazdaság számára, akkor azt a mezőgazdasági földterületek magasabb piaci értékének növelésére kell tőkésíteni, és fordítva. Míg az egyes növények profitálhatnak vagy károsodhatnak az éghajlatváltozásból, a gazdálkodók alkalmazkodási válaszait figyelembe véve a mezőgazdasági földterület értéke annak indexét képviseli, hogy a változások várhatóan előnyösek-e vagy sem. Mendelsohn et al. (1994) megvizsgálták a történelmi éghajlatváltozások és a mezőgazdasági földterületek értékének kapcsolatát, és arra a következtetésre jutottak, hogy a globális felmelegedés kismértékben előnyös lenne az amerikai mezőgazdaság számára.

Mendelsohn et al. módszere, amit David Ricardo, a földérték-tanulmányozásban úttörő 19. századi brit közgazdász után ricardói elemzésnek neveztek el, később kritika érte a szerzők részéről, akik azzal érveltek, hogy e módszer nem veszi figyelembe a földértékek közötti különbségeket, amelyek a fix helyhez kötött jellemzőknek tulajdoníthatók, így például a talajminőségnek, valamint a nem éghajlati változásoknak, beleértve a közeli urbanizációt is. Deschênes és Greenstone (2007) a mezőgazdasági profitot vizsgálták a földértékek helyett, és Mendelsohn et al. (1994) következtetéseihez hasonló következtetésekre jutottak, nevezetesen arra, hogy a múltbeli éghajlatváltozások viszonylag csekély hatással voltak a gazdaságok jövedelmezőségére, és hogy a felmelegedés összességében valószínűleg csekély előnyökkel járna az amerikai mezőgazdasági ágazat számára. A kritikusokkal folytatott későbbi eszmecsere azonban arra késztette őket (Deschênes és Greenstone 2012), hogy felülvizsgálják következtetéseiket, és a klímafelmelegedés miatt az amerikai mezőgazdaságban potenciálisan nagy veszteségeket jósoljanak.

Burke és Emerick (2016) az 1980 és 2000 közötti hőmérséklet-ingadozásokat vizsgálták, és azzal érveltek, hogy a gazdák nem voltak képesek úgy alkalmazkodni a hőmérséklet-változásokhoz, mint ahogyan azt a ricardói módszer feltételezi, és hogy a klímaváltozás nagy negatív hatással lenne a kukorica- és szójahozamokra. Schlenker és Roberts (2009) hasonlóképpen érveltek amellett, hogy a múltbeli felmelegedésből származó hozamnövekedés nem fog átragadni a jövőbe, és a kukorica- és szójahozamok meredeken csökkenni fognak ebben az évszázadban az éghajlatváltozás miatt.

Két újabb tanulmány azzal érvelt, hogy az ilyen pesszimista eredmények nem megbízhatóak. Ortiz-Bobea (2019) szerint a földértékek összesítik a mezőgazdasági és nem mezőgazdasági hatásokat, és az utóbbiakat ki kell szűrni. Létrehozott egy adathalmazt, amely a mezőgazdasági tevékenység készpénzes bérleti díjait használja a földérték mérésére, kifejezetten a mezőgazdasági tevékenység esetében. Míg a földérték-modell a klímafelmelegedés miatti jövőbeni veszteségeket vetített fel, ugyanez a modell, amelyet készpénzes bérleti díjakkal becsültek, nem ezt tette, ami arra a vezetett, hogy a szerző arra a következtetésre jutott, hogy a pesszimista eredmények a mezőgazdasági tevékenység hozamának pontatlan mérésének következményei. Bareille és Chakir (2023) egy nagy adatbázist állított össze a franciaországi mezőgazdasági eladási árakról olyan ingatlanok esetében,

amelyeket 1996 és 2019 között kétszer adtak el. Hagyományos ökonometriai modellezéssel meg tudták ismételni a felmelegedés mezőgazdasági földértékekre gyakorolt negatív hatásait mutató pesszimista eredményeket. De kihasználva az ismételt értékesítési adatokat, amelyek információt nyújtanak a földárak helyspecifikus változásairól, úgy találták, hogy az eredmények fordítottak, és arra utalnak, hogy a klímaváltozás nagyon előnyös lesz a francia mezőgazdaság számára. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy az alkalmazkodást figyelembe véve a melegedő éghajlat a korábban becsültnél két-húszszor nagyobb pozitív előnyökkel járna a francia mezőgazdaság számára. Átlagosan, teljes alkalmazkodás esetén úgy találták, hogy a közepes RCP4.5 forgatókönyv szerinti klímaváltozás 2100-ra megduplázhatja a francia termőföld értékét.

Mindezek a tanulmányok egyik fő hiányossága azonban, hogy kihagyják a CO_2-trágyázás szerepét. A klímaváltozást, ahogyan az jelen jelentéshez kapcsolódik, az üvegházgáz-kibocsátás, főként a CO_2 okozza. A fent említett ökonometriai elemzések csak a hőmérséklet- és csapadékváltozásokra összpontosítanak, és nem veszik figyelembe a további CO_2 jótékony növekedési hatását, amely ezeket hajtja. Amint a 2. fejezetben kifejtettük, a CO_2 a növények növekedésének egyik fő mozgatórugója, így ez a mulasztás az elemzést a klímaváltozás mezőgazdaságra gyakorolt előnyeinek alábecsülése felé torzítja.

9.2 A CO_2-dúsulás terepi és laboratóriumi vizsgálatai

A CO_2 növénynövekedésre gyakorolt hatását többek között a „szabad levegős dúsítási kísérletek" (FACE-parcellák) segítségével vizsgálták, amelyek során a növényeket körülvevő mezőkön kis CO_2-forrásokat helyeznek el, és rögzítik a növekedési reakciót a megnövekedett CO_2-szintre változó időjárási körülmények között. Ainsworth et al. (2020) körülbelül 250 ilyen vizsgálat eredményeit foglalja össze. Úgy találták, hogy a CO_2 200 ppm-es emelése átlagosan a C3 növények terméshozamában18 százalékos növekedést eredményezett. A C4 növények főként aszályos körülmények között mutattak előnyöket.

A FACE-parcella-kísérletek mellett több ezer laboratóriumi kísérletet végeztek a CO_2 hatásairól mindenféle növény növekedésére. Itt áttekintünk néhány eredményt a kulcsfontosságú amerikai mezőgazdasági növényekről.

Szója

A megnövekedett CO_2-koncentráció szójabab (Glycine max (L.) Merr.) növényekre gyakorolt hatásáról a kínai Huang-Huai-Hai síkság vízhiányos régiójában végzett tanulmányok kimutatták, hogy a megnövekedett CO_2-koncentráció javította a fotoszintézis sebességét, a vízfelhasználás hatékonyságát és a növekedést Li (2013) mind normál, mind aszályos körülmények között. A CO_2Science.org weboldal 108 publikált kísérletről számol be 1985 és 2019 között, amelyekben a szójababot dúsított CO_2-szintnek tették ki. Egy +300 ppm-es általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +50,9 százalék volt. Tíz tanulmány számolt be +600 ppm CO_2-dúsításról is, amely átlagosan 90,3%-kal növelte a fotoszintézist.

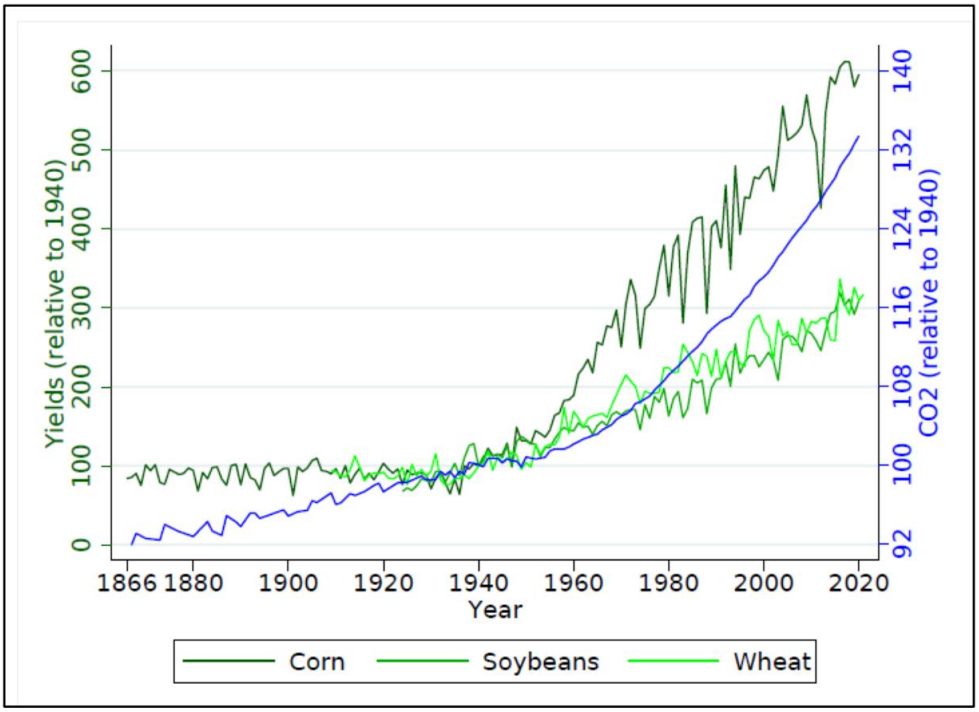
Kukorica

A CO_2Science.org weboldal 28 publikált kísérletről számol be 1983 és 2018 között, amelyekben kukoricát (Zea mays L.) tettek ki dúsított CO_2-szintnek. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +23,7 százalék volt. A kukorica a megnövekedett CO_2-szint mellett a szárazságtűrésből is profitál. Egy kísérleti tanulmány (Allen Jr., 2011) a növényeket napsütötte, szabályozott környezetű kamrákban 360 ppm (környezeti) és 720 ppm (emelt) CO_2-szint mellett vízstressznek tették ki. A szárazságstressz 41 százalékos növekedésveszteséget okozott környezeti CO_2-szint mellett, de csak 13 százalékos veszteséget emelt CO_2-szint mellett.

Búza

A CO_2Science.org weboldal 92 publikált kísérletről számol be 1983 és 2020 között, amelyekben a közönséges búzát (Triticum aestivum L.) dúsított CO_2-szintnek tették ki. +300 ppm általános skálára átszámítva az átlagos növekedési előny +67,6 százalék volt. Blandino (2020) megmérte egy „javító"

hibrid búzafajta és szülőfajtáinak terméshozamát és tápértékét megemelt CO_2-szint (+166 ppm) mellett. A jelentések szerint a szemtermés +16 százalékkal nőtt, de a szemfehérje-szint 7 százalékkal csökkent. Azt is megállapították azonban, hogy a különböző búzafajták tápértéke eltérően reagált a megemelkedett CO_2-szintre, így megfelelő fajtaválasztással a termelők olyan búzafajtákat választhattak, amelyek a legjobban élnek a megemelkedett CO_2-szint által jelentett körülményekkel.



9.1. ábra: Az Egyesült Államok átlagos CO_2-szintje és a kukorica, a szója és a búza terméshozamai normalizálódtak, így 1940=100. Forrás: Taylor és Schlenker (2021)

További bizonyítékok

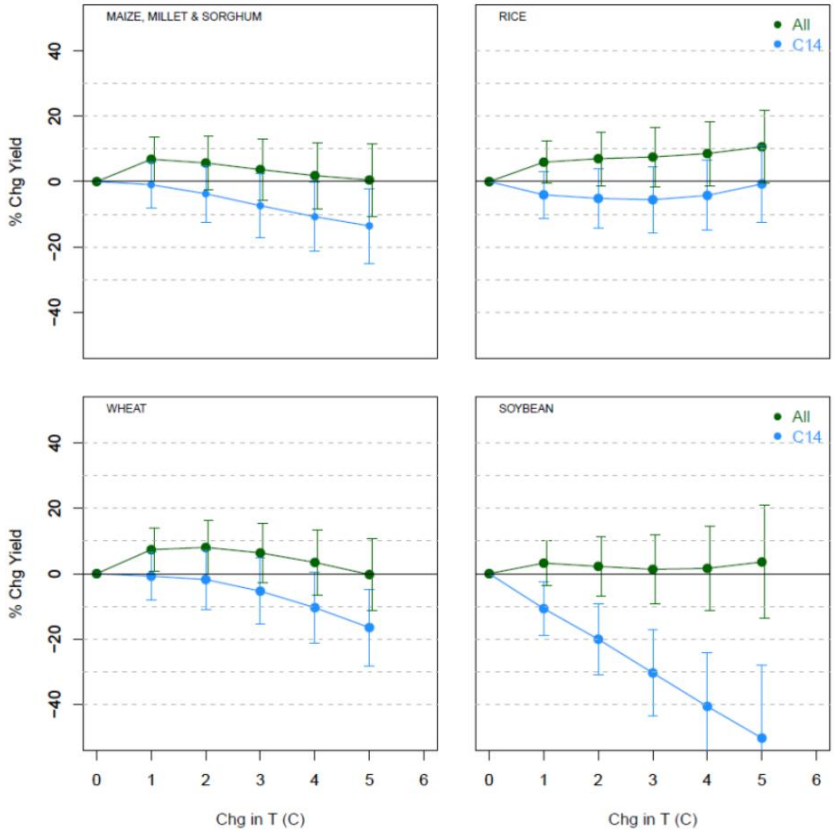
Az Egyesült Államok Nemzeti Gazdaságkutató Irodájának 2021-es jelentése (Taylor és Schlenker 2021) az Egyesült Államokban műholdas mérésekkel megfigyelt kültéri CO_2-szinteket használt fel, amelyekhez megyei szintű mezőgazdasági termelési adatokkal és más gazdasági változókkal illesztettek. Az időjárás, a szennyezés és a technológia hatásainak kiszűrése után a szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a CO_2-kibocsátás 1940 óta 50-80 százalékkal növelte az amerikai növénytermesztést, ami sokkal nagyobb nyereséget eredményezett, mint amennyit korábban FACE-kísérletekkel becsültek. Úgy találták, hogy a CO_2-koncentráció minden ppm-es növekedése 0,5 százalékkal növeli a kukorica, 0,6 százalékkal a szójabab és 0,8 százalékkal a búza terméshozamát.

A növekedési előnyökön túl a többlet CO_2 fokozza a növények szárazsággal szembeni ellenálló képességét. Lásd a 2.1.3. szakaszban található diszkussziót.

9.3 Termésmodellezési metaelemzések

Annak ellenére, hogy bizonyítékok bősége áll rendelkezésre arra, hogy a CO_2 és a CO_2 által kiváltott felmelegedés a növénynövekedés számára közvetlenül előnyös, az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA 2023) 2023-ban körülbelül ötszörösre növelte a szén-dioxid társadalmi költségének (SCC) becslését, nagyrészt a klímafelmelegedés okozta globális mezőgazdasági károk nagyon pesszimista 2017-es becslése alapján (Moore et al., 2017). Az EPA által használt két kármodell egyike a 2030-as szubszaharai szelek közel felét a Moore et al. (2017)

elemzése alapján előre jelzett globális mezőgazdasági károknak tulajdonította. Ez a tanulmány különféle éghajlati felmelegedési forgatókönyvek mellett végzett metaanalízist mezőgazdasági növények hozamváltozásait szimulálására. A Moore et al.-féle tanulmány a felmelegedés miatt minden növénytípusra és minden régióra vonatkozóan a globális terméshozam csökkenését vetítette előre.



9.2. ábra: Terméshozamok CO_2-indukált éghajlati felmelegedés esetén. Kék: Moore et al. (2017) publikációja szerint. Zöld: a kihagyott adatok figyelembevétele után. Forrás: McKitrick (2025).

McKitrick (2025) újra megvizsgálta a Moore et al. adatbázisát, és megállapította, hogy bár az Moore-ék állítása szerint 1722 tanulmányt fed le, ezeknek csak a fele (N=862) tartalmazott teljes megfigyelést, így a regresszióanalízishez rendelkezésre álló minta sokkal kisebb volt, mint amit a két tanulmány jelzett. McKitrick megjegyezte, hogy a leggyakrabban hiányzó megfigyelési tételek a környezeti CO_2-változás volt, és megállapította, hogy ezek sok esetben az alapul szolgáló tanulmányokból vagy az eredeti éghajlati forgatókönyv-táblázatokból visszanyerhetők voltak, ezáltal a felhasználható minta mérete 40 százalékkal megnőtt. Az újonnan rendelkezésre álló adatokat tartalmazó terméshozam-előrejelzések jelentősen megváltoztak. Amint a 9.2. ábra mutatja, míg a részleges adatkészlet a felmelegedés hozamcsökkenését sugallta (kék vonalak), a teljes adatkészlet állandó vagy növekvő globális hozamokat jelzett, még 5°C-os felmelegedés esetén is (zöld vonalak).

9.4 A CO_2-trágyázás és a tápanyagvesztés

A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO_2 által kiváltott biomassza-növekedést néha a fehérje és egyéb kulcsfontosságú tápanyagok, például a vas és a cink koncentrációjának csökkenése kíséri (Ebi et al. 2021). Néhány kísérlet kimutatta, hogy a magasabb CO_2-szinttel várhatóan együtt járó emelkedő hőmérséklet ellensúlyozza ezt a veszteséget (Köhler et al. 2019), bár az erre vonatkozó bizonyítékok vegyesek, akárcsak az a bizonyíték, hogy a mai napig megfigyelt tápanyag-hígulás teljes mértékben a magasabb CO_2-szintnek tulajdonítható (Ziska 2022). Ha tápanyag-hígulás következik be a növekvő CO_2-szint mellett, számos adaptív stratégia alkalmazható.

Először is, a mikrotápanyag-tartalom növelésére irányuló szelektív nemesítés (Saltzman et al. 2017) már bevált és költséghatékony agronómiai stratégiának bizonyult (Ebi et al. 2021). A stratégiák jelenthetnek mind hagyományos nemesítést, mind genetikailag módosított szervezeteket. Ez utóbbira példa az aranyrizs, amely megnövelt mennyiségű béta-karotint tartalmaz az A-vitamin az emberi szervezetben való bioszintézisének fokozása érdekében. Az optimális stratégiák helyspecifikusak, mivel növényenként, éghajlatonként és talajtípusonként változnak (Ebi et al. 2021). Másodszor, az élelmiszerek mikrotápanyagokkal való dúsítása már rutinszerű. A folsavat (egy B-vitamin) liszthez és sok más élelmiszerhez adják; jódot adnak az asztali sóhoz, a legtöbb kereskedelmi forgalomban kapható reggeli gabonapelyhet vassal és számos vitaminnal dúsítják stb. Harmadszor, a multivitamin tabletták formájában kapható étrend-kiegészítők olcsók, széles körben elérhetők és rutinszerűen fogyasztják őket.

Az adaptív stratégiákra való támaszkodással kapcsolatos egyik aggodalom az, hogy megvalósíthatók-e az alacsony jövedelmű országokban. A mikrotápanyag-hiány már most is problémát jelent a fejlődő világban, és az étrend-kiegészítők hatékony, alacsony költségű válasznak bizonyultak (Ebi et al. 2021). Azt is meg kell jegyezni, hogy az IPCC magas szintű felmelegedést generáló kibocsátási forgatókönyvei erős jövedelemnövekedést is tartalmaznak. Az SSP forgatókönyvek[3] azt feltételezik, hogy a 2005-ös szinthez képest a globális egy főre jutó jövedelem 2100-ra legalacsonyabb növekedési esetben (SSP3) megduplázódik, a legmagasabb kibocsátási esetben (SSP5) pedig közel 16-szorosára nő. Ebben a forgatókönyvben még a legszegényebb régiók (Afrika és a Közel-Kelet) egy főre jutó jövedelme is körülbelül 126 000 USD, ami 70 százalékkal magasabb, mint a jelenlegi amerikai egy főre jutó jövedelem (körülbelül 75 000 USD). Következésképpen ugyanazok a forgatókönyvek, amelyekben a CO_2-szint a legnagyobb mértékben növekszik, lényegében a globális szegénység is megszűnik, és ebben az esetben minden ország megengedhetné magának a szükséges étrend-kiegészítőket a mikrotápanyag-hiányok kezelésére, ha annak a szükségessége felmerülne, mert nem orvosolható a mezőgazdasági stratégiákkal.

Összefoglalva, évtizedekre visszamenően bőséges bizonyítékok vannak arra, hogy a növekvő CO_2-szint előnyös a növények, így a mezőgazdasági növények számára, és hogy a CO_2 által kiváltott felmelegedés az Egyesült Államok mezőgazdaságának nettó előnyt jelent. Amennyiben a tápanyagok felhígulnak, rendelkezésre állnak enyhítő stratégiák, amelyeket meg kell vizsgálni és a helyi körülményekhez kell igazítani.

Hivatkozások

Ainsworth, Elizabeth and Stephen P. Long (2020) 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? Global Change Biology https://doi.org/10.1111/gcb.15375

Allen Jr, L. K. (2011). Elevated CO_2 increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. Journal of Plant physiology, 168(16), 1909-1918.

Bareille, F. and R. Chakir (2023) The impact of climate change on agriculture: A repeat-Ricardian analysis. Journal of Environmental Economics and Management 119

Blandino, M. B. (2020). Elevated CO_2 impact on common wheat (Triticum aestivum L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. Journal of agricultural and food chemistry, 68(39), 10574-10585.

Burke, Marshall and Kyle Emerick (2016) Adaptation to Climate Change: Evidence from US Agriculture. American Economic Journal: Economic Policy 8(3) August 2016 106—140 https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/pol.20130025

Cheng, L., Zhang, L., Wang, YP. et al. Recent increases in terrestrial carbon uptake at little cost to the water cycle. Nature Communications 8, 110 (2017). https://doi.org/10.1038/s41467-017-00114-5

[3] Lásd az összeállítást az Our World in Data oldalon.

CO2Science.org (undated) Plant growth archive http://www.co2science.org/data/plant_growth/dry/dry_subject_b.php

Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C. et al. (2021) Regional disparities in the beneficial effects of rising CO_2 concentrations on crop water productivity. Nature Climate Change 6, 786–790 (2016). https://doi.org/10.1038/nclimate2995

Deschênes, Olivier and Michael Greenstone (2012) The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather: Reply to Comment American Economic Review. 102, no. 7: 3761-3773. http://hdl.handle.net/1721.1/82641

Ebi, Kristie L, C Leigh Anderson, Jeremy J Hess, et al. (2021) Nutritional quality of crops in a high CO_2 world: an agenda for research and technology development. Environmental Research Letters 16(6) 064045 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abfcfa

Köhler, Iris H., Steven C. Huber, Carl J. Bernacchi, Ivan R. Baxter (2019) Increased temperatures may safeguard the nutritional quality of crops under future elevated CO_2 concentrations. The Plant Journal 97(5) 872 – 886 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/tpj.14166

Li, D. L. (2013). Effects of elevated CO_2 on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean (Glycine max (L.) Merr.) under drought stress. Agricultural Water Management, 129, 105-112.

McKitrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. Scientific Reports 15 article 5575 https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. The American Economic Review, Sept 1994 753-771.

Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. Nature Communications 8:1607. https://doi. org/10. 1038/s41467-017-01792-x

Ortiz-Bobea, Ariel (2019) The role of nonfarm influences in ricardian estimates of climate change impacts on US agriculture. American Journal of Agricultural Economics. 102 (3), 934–959.

Saltzman, Amy, Ekin Birol, Adewale Oparinde et al. (2017) Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. Annals of the New York Academy of Sciences Volume 1390, Issue1 https://doi.org/10.1111/nyas.13314

Schlenker, Wolfram and Michael Roberts (2009) Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences 106 (37) 15594-15598 https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106

Taylor, Charles and Wolfram Schlenker (2023) Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO_2 fertilization of US field crops. National Bureau of Economic Research Working paper 29320, https://www.nber.org/papers/w29320

US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, "Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review", EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, Nov. 2023, https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf

Zhang et al. (2024) Less than 4% of dryland areas are projected to desertify despite increased aridity under climate change. Nature Communications Earth and Environment 5 June 2024 https://www.nature.com/articles/s43247-024-01463-y

Ziska, Lewis H (2022) Rising Carbon Dioxide and Global Nutrition: Evidence and Action Needed. Plants 1(7), 1000; https://doi.org/10.3390/plants11071000

10 A SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS KOCKÁZATKEZELÉSE

Fejezet-összefoglaló

A szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit mindenekelőtt a népességnövekedés és a gazdasági növekedés határozza meg. A technológiai fejlődés, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési előírások, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Az Egyesült Államok gazdaságának bővülése enyhítette a katasztrófaköltségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja. A hőséggel kapcsolatos elhalálozási kockázat az alkalmazkodási (adaptációs) intézkedéseknek (így a légkondicionálás bevezetésének) a következményeként jelentősen csökkent. Mindezek a megfizethető energia elérhetőségétől függenek. Az Egyesült Államokban az elhalálozási kockázat várhatóan még szélsőséges felmelegedési forgatókönyvek esetén sem emelkedik, amennyiben az emberek képesek a változásokhoz alkalmazkodni.

10.1 A társadalmi-gazdasági háttér

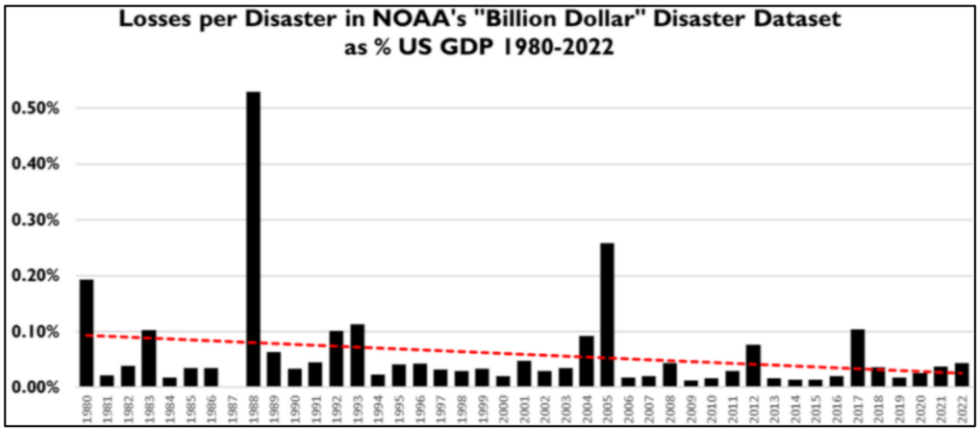
Az ember okozta éghajlatváltozás kockázatbefolyásoló tényezője a természetes időjárás és az éghajlat változékonysága. E tényezőt a part menti és az egyéb katasztrófáknak kiszolgáltatott régiók gazdagságának kitettsége, valamint a szegényebb lakosság sebezhetősége határozza meg. Az Egyesült Államokban az éghajlati kockázat alakulását társadalmi tényezők, nem pedig a tényleges időjárási és éghajlati veszélyek változásai határozták meg. Az időjárási katasztrófák okozta halálesetek száma 1900 óta jelentősen csökkent, annak ellenére, hogy az Egyesült Államok lakossága 1900-ban 76 millióról 2020-ra több mint 331 millióra nőtt (Goklany 2011). Például a galvestoni hurrikán 1900-ban több mint 8000 ember halálát okozta (az Egyesült Államok lakosságának 0,01 százaléka), míg a legsúlyosabb közelmúltbeli katasztrófa, a 2005-ös Katrina hurrikán csak 1800 ember halálát (vagyis az Egyesült Államok lakosságának 0,0006 százaléka) (NOAA Nemzeti Hurrikánközpont 2025; Egyesült Államok Népszámlálási Hivatala 2025).

A technológiai fejlődés jelentősen csökkentette a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A korai figyelmeztető rendszerek, a műholdas megfigyelés és a jobb időjárás-előrejelzés csökkentette a halálesetek számát, bár a pontos adatokat nehéz számszerűsíteni (Deryugina és Hsiang 2023). Az amerikai időjárás-előrejelzési becslések szerint éves szinten 31,5 milliárd dolláros haszonnal csökkentik az időjárási események okozta veszteségeket, védve emberéleteket, vagyontárgyakat, valamint támogatva a mezőgazdaságot és a közlekedést (NRC 2010). A jobb hurrikán-előrejelzés csökkentette a partraszállás előtti és utáni kiadásokat, a hurrikánonkénti éves költségcsökkenés becslések szerint 5 milliárd dollár (Molina és Rudik 2024).

Az infrastrukturális fejlesztés jelentősen hozzájárult a szélsőséges időjárási események okozta veszteségek csökkentéséhez. Az építési szabályzatok, mint például a Floridában az Andrew hurrikán (1992) után bevezetett előírás, azáltal csökkentették a veszteségeket, hogy biztosították, hogy az épületek ellenálljanak a nagy szélnek és az áradásoknak. A 2002 után épült házak a Michael hurrikán (2018) alatt minimális károkat szenvedtek, ellentétben a régebbi házakkal (FEMA 2020). A tengerparti falak, mint például a Galveston tengerparti fala, védelmet nyújtanak a hullámverés és a viharhullámok ellen. A New Orleans-i hurrikán- és viharkár-kockázatcsökkentő rendszer sikeresen mérsékelte a viharhullámot az Isaac hurrikán (2012) alatt (Battelle Memorial Institute 2013). Az Egyesült Államok szárazföldi gátjai azáltal segítenek az áradások szabályozásában, hogy tárolják a heves esőzések során felgyülemlett felesleges vizet. A becslések szerint a Tennessee Valley Authority (TVA) gátjai a TVA régióban, valamint az Ohio és Mississippi folyók mentén körülbelül 309 millió dollár éves árvízkárt akadályoznak meg (TVA, 2025). A Helene hurrikán (2024) során a TVA stratégiái körülbelül 406 millió dollárnyi potenciális kárt akadályoztak meg (APPA 2024).

10.2 Az adatok által jelentett kihívások

A NOAA 1980 óta közöl adatokat az Egyesült Államokban évente előforduló időjárással kapcsolatos katasztrófákról. A becslések szerint a kár meghaladta az 1 milliárd dollárt (inflációval korrigálva), és 2008-tól kezdődően jelentős növekedést mutat. A NOAA és más kormányzati tisztviselők a milliárd dollárnyi katasztrófa-sorozat (Billon Dollar Disaster) emelkedő tendenciáját említették bizonyítékként arra, hogy az éghajlatváltozás súlyosbítja a szélsőséges időjárást (Pielke Jr., 2024). Az idő múlásával azonban az Egyesült Államok népessége és vagyona drámaian megnőtt, így amikor szélsőséges időjárási vagy éghajlati esemény következik be, még akkor is nagyobb a kár, ha nincs mögöttes trend a szélsőséges időjárás gyakoriságában vagy intenzitásában. Pielke Jr. (2024) kimutatja, hogy az időjárási katasztrófákra jutó veszteségek GDP-arányosan körülbelül 80 százalékkal csökkentek 1980 óta, amint azt a 10.1. ábra is mutatja. Pielke Jr. (2024) azt is állította, hogy NOAA nem csupán áttekinthetetlen adatforrásokra és a nem bejelentett kiigazításokra támaszkodott, hanem a NOAA a milliárd dolláros katasztrófákra vonatkozó adatsorait sem normalizálta a lakosság kitettségének és vagyonváltozásainak megfelelően. 2025 májusában a NOAA bejelentette, hogy visszavonta a Billion Dollar Disaster („milliárd dolláros katasztrófa”) elnevezésű publikációs termékét (Pielke Jr., 2025).



10.1. ábra: Katasztrófák okozta veszteségek a bruttó hazai termék százalékában a NOAA ún. Billion Dollar Disaster (milliárd dolláros katasztrófa)-adatbázisában (2023 júliusában letöltött verzió), 1980–2022. Forrás: (Pielke, Jr. 2024)

Összefoglalva, a szélsőséges időjárási és éghajlati események okozta veszteségek trendjeit a népességnövekedés és a gazdasági növekedés uralja. A technológiai fejlesztések, mint például a jobb időjárás-előrejelzés és a korai figyelmeztető rendszerek, jelentősen csökkentették a szélsőséges időjárási események okozta veszteségeket. A jobb építési szabályzatok, az árvízvédelem és a katasztrófaelhárítási mechanizmusok csökkentették a GDP-hez viszonyított gazdasági veszteségeket. Végül az Egyesült Államok gazdaságának bővülése felhígította a katasztrófaköltségek relatív hatását, amint azt a történelmi és a modern GDP-százalékok összehasonlítása is mutatja.

10.3 Halálozás a hőmérsékleti szélsőségek miatt

10.3.1 Hőség- és hidegkockázatok

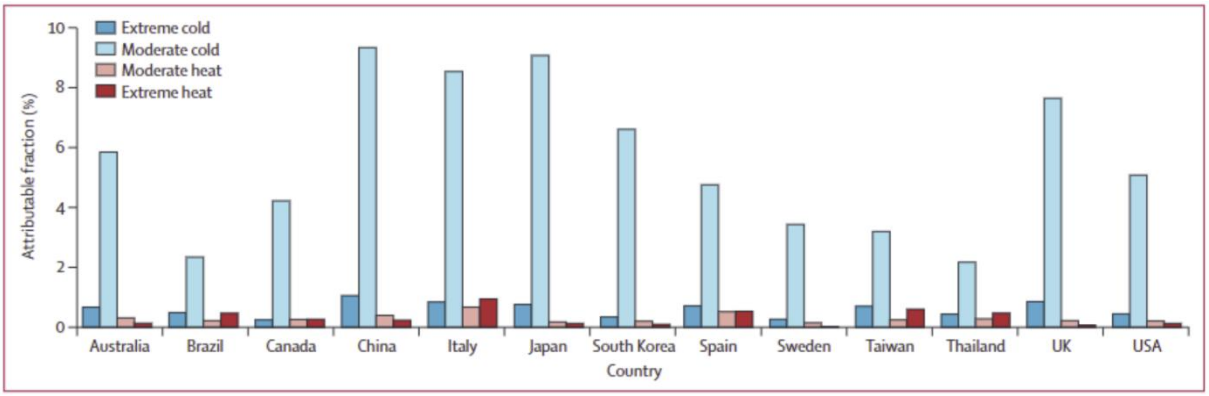
A hőmérsékleti szélsőségek változásai a legbiztosabb hatások közé tartoznak, amelyek várhatóan egy felmelegedő világban várhatóak. Logikus, hogy a szélsőséges hőség eseményei valószínűleg gyakoribbá válnak, míg a szélsőséges hideg események ritkábbá. Ez a mintázat a

történelmi időszakban nyilvánvaló, és a további felmelegedéssel várhatóan folytatódni fog, bár nem az Egyesült Államok kontinentális részén (6. fejezet),

Hőségek idején a halálozást jellemzően hőguta és hőkimerültség okozza, míg hideg szélsőségek idején a halálozás jellemzően a hipotermiából és a szív megterheléséből fakad. A globális halálozási arány hideg körülmények között lényegesen magasabb, mint melegben (Zhao et al. 2021, Ritchie 2024). A hőséggel összefüggő halálozással ellentétben a hideg időjárás kockázatai már mérsékelten hideg körülmények között is fennállnak (Gasparini et al. 2015, Lee és Dessler 2023). Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) (a Betegségellenőrzési és Megelőzési Központok adataira hivatkozva) arról számol be, hogy 1999 és 2015 között átlagosan 2,2 haláleset történt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hideg volt a fő kiváltó ok, és további 2,4 haláleset egymillió amerikaira vetítve, amelyeknél a hideg közrejátszott (EPA 2025). Ezzel szemben 1,3 haláleset volt egymillió amerikaira vetítve, amelyek esetén a hőség volt a fő ok, és további 0,8 haláleset egymillió emberre vetítve, amelyeknél a hőség közrejátszott. Ezzel a mutatóval mérve a hideg körülbelül kétszer annyi időjárással összefüggő halálesetért felelős, mint a hőség.

Azok az epidemiológiai módszerek, amelyek a korrelációs bizonyítékokat – nem csak a halotti anyakönyvi kivonatokat – veszik figyelembe, azt mutatják, hogy a hideg/meleg arány sokkal magasabb lehet. Egy 13 országban végzett, 1985 és 2012 között 74 millió halálesetet felölelő tanulmány becslése szerint a halálesetek átlagosan 7,7 százaléka az optimális tartományon kívüli hőmérsékletnek volt tulajdonítható, ebből 7,4 százalék a hidegnek, és csak 0,4 százalék a melegnek (Gasparini et al. 2015). Más szóval, a hideg időjárás 18,5-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.

A 10.2. ábra Gasparini et al. (2015) eredményeinek országonkénti eloszlását mutatja. Az Egyesült Államokban a hőmérsékletnek tulajdonítható halálesetek aránya 5,9 százalék, ebből 5,5 százalék a hidegre vezethető vissza, így a hideg időjárás 14-szer annyi ember halálát okozta, mint a meleg időjárás.



10.2. ábra: A szélsőséges és mérsékelt hidegnek és melegnek tulajdonítható halálozások országonként. Forrás: Gasparini et al. (2015) alapján reprodukálva.

Erős bizonyítékok léteznek arra, hogy az emberek alkalmazkodnak az időjárási kockázatokhoz. Lee és Dessler (2023) arról számoltak be, hogy az Egyesült Államok 40 városában a hőmérséklettel összefüggő halálesetek 86 százaléka a hideggel összefüggő halálozásnak volt köszönhető, és hogy az évszakos hőmérséklet emelkedésével az alkalmazkodás miatt a halálozás relatív kockázata mind a meleg, mind a hideg városokban csökkent. Allen és Sheridan (2018) megállapították, hogy a rövid, éveleji hideg események 2-5-ször halálosabbak, mint a meleg események, de mind a hideg, mind a meleg szélsőségek halálozási kockázata közel nullára csökken, ha az események a hideg évszak végén következnek be.

Davis et al. (2003) 28 amerikai városban vizsgálta a hőséggel összefüggő halálozást az 1960-as évektől az 1990-es évek végéig, és azt találták, hogy a mintavételi időszakban a hővel összefüggő elhalálozás háromnegyedével csökkent. Bobb et al. (2014) több mint 100 amerikai város 106 millió

lakosának elhalálozási adatait vizsgálta, és azt találta, hogy az 1987 és 2005 közötti időszakban az átlagos hőség okozta halálozás 60 százalékkal csökkent, 51 ezrelékes halálesetről 19-re.Azt is kimutatták, hogy a legnagyobb csökkenés a 75 év feletti idősek körében következett be. Egy 211 amerikai városban 1962 és 2006 között bekövetkezett 42 millió halálesetet vizsgáló tanulmányban Nordio et al. (2015) a túlzott hőség okozta halálozás kockázatában több mint 90 százalékos csökkenést találtak.

A hőség okozta halálozás jelentős csökkenésével összefüggésben a hőmérséklet emelkedése nettó életmentést jelent, mivel csökkenti a hideg események által okozott halálesetek számát. Az AR6 Munkacsoport 2. fejezetének 16.2.3.5. fejezete (O'Neill et al. 2022) elismeri, hogy a hőség okozta halálozási kockázat idővel csökken:

> A hőségnek tulajdonítható elhalálozási arányok a legtöbb országban az idők során csökkentek az egészségügyi rendszerek általános javulása, a lakossági légkondicionálás növekvő elterjedtsége és a viselkedésbeli változások miatt. E tényezők határozzák meg a lakosság hőérzékenységét, túlsúlyba kerülve a hőmérsékletváltozás hatásával szemben.

Az IPCC az AR6 Összefoglaló jelentésében mégis félreértelmezi az általános helyzetet. A dokumentum A.2.5. szakasza kimondja: „A szélsőséges hőség eseményeinek növekedése minden régióban emberi halálozáshoz és megbetegedéshez vezetett (*nagyon magas megbízhatóság*)." De hallgat arról, hogy a szélsőséges hideg események során a halálesetek száma nagyobb mértékben csökkent.

Az Egyesült Államokban megfigyelt hőséggel összefüggő elhalálozásiarány-csökkenést kifejezetten az alkalmazkodásnak tulajdonították. Wang et al. (2018) 209 amerikai városban vizsgálta meg a hőhullámokkal összefüggő elhalálozási arány térbeli változékonyságát 1962 és 2006 között. Míg az egyszerű korreláció a hőhullámok alatti halálozási kockázat növekedését sugallta, a hőhullám intenzitásához való alkalmazkodás figyelembevétele azt eredményezte, hogy a hatás közel nullára esett, és statisztikailag jelentéktelenné vált. Epidemiológiai modelljük eredményeit felhasználva a hőséggel összefüggő halálozási arányt négy RCP felmelegedési forgatókönyv (köztük az RCP8.5) szerint (adaptív viselkedéssel és anélkül) 2050-ig kivetítették. Feltételezték, hogy az emberek továbbra is alkalmazkodnak a hőhullám-kockázathoz azokban a régiókban, ahol élnek. Wang et al. (2018) az Egyesült Államokban nemcsak a hőséggel összefüggő halálozások növekedését vetíti előre, hanem az általános halálozási arány csökkenését is. Arra a következtetésre jutottak, hogy

> „Az alkalmazkodás figyelmen kívül hagyása a hőhullámokkal kapcsolatos jövőbeli elhalálozási arány jelentős túlbecsléséhez vezetne… Az alkalmazkodást figyelembe véve a hőséggel összefüggő teljes elhalálozási arány 2050-re idővel nem változna jelentősen a 2006-os szinthez képest."

10.3.2 Halálozási kockázatok és energiaköltségek

Egy 2016-os, az Egyesült Államokban a hőmérséklet-ingadozásokkal összefüggő hosszú távú elhalálozási kockázatokról szóló tanulmány (Barreca et al. 2016) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban az elhalálozási arány növekedése összefügg mind a hideg, mind a meleg időjárással. Idővel azonban az áram bevezetése, valamint a központi fűtés és a légkondicionálás (AC) elterjedése drámaian csökkentette mindkét kockázatot, különösen a meleg időjárással összefüggő kockázatokat. 1960 előtt egy 32°C feletti nap 2,2 százalékkal növelte az átlagos elhalálozási kockázati arányt, de 1960 után ugyanez az időjárás csak 0,3 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, ami 85 százalékos csökkenést jelent. 1960 előtt a 4°C (39°F) alatti hőmérséklet körülbelül 1 százalékkal növelte az elhalálozási kockázatot, de 1960 után ugyanez az időjárás e számnak csak körülbelül a felét tette ki. A hagyományos háztartási fejlesztéseken keresztüli alkalmazkodás drámaian csökkentette a

lakosság kiszolgáltatottságát az időjárási szélsőségekkel szemben. A meleg időjárás miatti elhalálozás teljes csökkenése a beltéri légkondicionálók széles körű elterjedésének volt betudható, ami a megbízható és megfizethető áram elérhetőségétől függ.

Ennek a megállapításnak a következménye, hogy a fűtési és a hűtési rendszerek használata az energia megfizethetőségétől függ. Doremus et al. (2022) kimutatta, hogy az Egyesült Államokban a gazdag és a szegény háztartások hasonló ütemben igazítják energiakiadásaikat a mérsékelt hőmérséklet-ingadozásokra, de nem a szélsőséges hőmérséklet-ingadozásokra. Amikor a hőmérséklet nagyon hideg szintre (< 5°C) ingadozik, a magas jövedelmű háztartások energiakiadásai 1,2 százalékkal, az alacsony jövedelmű háztartásokéi pedig csak 0,5 százalékkal nőnek. Nagyon forró napokon (>30°C) a magas jövedelmű háztartások áramkiadásai 0,5 százalékkal nőnek, míg az alacsony jövedelmű háztartásokéiban egyáltalán nem változnak. Ez utóbbi eredmény még azokban az almintákban is megfigyelhető, ahol minden háztartásban van légkondicionáló. Cong et al. (2022) hasonló eredményekről számoltak be egy arizonai háztartásokból álló mintán. Mindez azt mutatja, hogy a fűtési és hűtési rendszerek széles körű elterjedése ellenére az energia megfizethetetlensége következtében az alacsony jövedelmű háztartások ki vannak téve az időjárási szélsőségeknek.

Hivatkozások

Allen, M.J. and S.C. Sheridan (2018) Mortality risks during extreme temperature events (ETEs) using a distributed lag non-linear model. (2018) International Journal of Biometeorology 62, 57–67 (2018). https://doi.org/10.1007/s00484-015-1117-4

American Public Power Association. (APPA, 2024, March 7). TVA flood mitigation strategies prevented approximately $406 million in potential damages. Public Power Current. https://www.publicpower.org/periodical/article/tva-flood-mitigation-strategies-prevented-approximately-406-million-potential-damages

Barreca, Alan, Karen Clay, Olivier Deschenes, Michael Greenstone, and Joseph S Shapiro (2016), Adapting to climate change: The remarkable decline in the US temperature mortality relationship over the twentieth century, Journal of Political Economy, 2016, 124 (1), 105–159.

Battelle Memorial Institute. (2013, December). Final independent external peer review report: Hurricane Isaac (2012) assessment (Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, New Orleans District). https://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/PeerReview/TCN13-003HurrIsaacAssessIEPRFinal.pdf

Bobb JF, RD Peng, ML Bell and F Dominici (2014) Heat-related mortality and adaptation to heat in the United States. Environmental Health Perspectives 122:811–816; https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1307392

Cong, S., D. Nock, Y.L. Qiu, Y.L. et al. Unveiling hidden energy poverty using the energy equity gap. Nature Communications 13, 2456 (2022). https://doi.org/10.1038/s41467-022-30146-5

Davis, Robert E., Paul C. Knappenberger, Patrick J. Michaels and Wendy M. Novicoff (2003) “Changing Heat-Related Mortality in the United States” Environmental Health Perspectives 111(14) November 2003 pp. 1712—1718 https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.6336

Deryugina, T., & Hsiang, S. M. (2023). Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States (NBER Working Paper No. 31361). National Bureau of Economic Research. https://www.nber.org/papers/w31361

Doremus, JM, I. Jacqz and S. Johnston (2022), “Sweating the energy bill: Extreme weather, poor households, and the energy spending gap.” Journal of Environmental Economics and Management, doi: https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102609 .

Environmental Protection Agency (2025) Climate Change Indicators. https://www.epa.gov/climate-indicators/view-indicators

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020, February 13). The role of Florida's building codes in Hurricane Michael recovery. https://www.fema.gov/case-study/role-floridas-building-codes-2018-hurricane-michael

Gasparini, A., Y. Guo, M. Hashizume et al. (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. The Lancet 386: 369-385 July 25, 2015 http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0

Goklany, I. M. (2011). Deaths from extreme weather events, 1900–2010. Reason Foundation. https://a8d50b36.delivery.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2011/09/deaths_from_extreme_weather_1900_2010.pdf

Lee, Jangho and Andrew Dessler (2023) Future Temperature-Related Deaths in the U.S.: The Impact of Climate Change, Demographics, and Adaptation. GeoHealth 7(8) August 2023 https://doi.org/10.1029/2023GH000799

Molina, R and I Rudik (2024) The value of improving hurricane forecasts. National Bureau of Economic Research Working Paper 32548 June 2024. https://www.nber.org/digest/202409/value-improving-hurricane-forecasts

National Hurricane Center. (n.d.). Costliest U.S. tropical cyclones tables updated. NOAA National Hurricane Center. Retrieved May 8, 2025, from https://www.nhc.noaa.gov/outreach/history/

National Research Council. (2010). Adapting to the impacts of climate change. The National Academies Press. https://nap.nationalacademies.org/read/12888/chapter/2

Nordio, Francesco, Antonella Zanobetti, Elena Colicino, Itai Kloog and Joel Schwartz (2015). "Changing patterns of the temperature–mortality association by time and location in the US, and implications for climate change" Environment International Volume 81, pp 80-86 https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.009.

O'Neill, B., et al. (2022). Key risks across sectors and regions. In AR6 Working Group II Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 2411–2538). Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch

Pielke Jr., R. (2024). Scientific integrity and U.S. 'billion dollar disasters'. npj Natural Hazards, 1, Article 12. https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0

Pielke Jr., R. (2025, May 8). RIP NOAA's billion dollar disasters. The Honest Broker [Substack]. https://rogerpielkejr.substack.com/p/rip-noaas-billion-dollar-disasters

Ritchie, H. (2024). How many people die from extreme temperatures, and how this could change in the future: Part one. Our World in Data. https://ourworldindata.org/part-one-how-many-people-die-from-extreme-temperatures-and-how-could-this-change-in-the-future

Tennessee Valley Authority (TVA). (n.d.). Flood management. Retrieved May 8, 2025, from https://www.tva.com/environment/managing-the-river/flood-management

U.S. Census Bureau. (n.d.). Decennial census by decade. Retrieved May 8, 2025, from https://www.census.gov/programs-surveys/decennial-census/decade.html

Wang, Yan, Francesco Nordio , John Nairn , Antonella Zanobetti and Joel D. Schwartz (2018) "Accounting for adaptation and intensity in projecting heat wave-related mortality" Environmental Research 161 pp. 464—471. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.049

Zhao, Q., et al. (2021). Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: A three-stage modelling study. The Lancet Planetary Health, 5(7). https://doi.org/10.1016/s2542-5196(21)00081-4

11 A KLÍMAVÁLTOZÁS, A GAZDASÁG, VALAMINT A SZÉN TÁRSADALMI KÖLTSÉGE

Fejezet-összefoglaló

A közgazdászok a gazdasági növekedés szempontjából az éghajlatot már régóta viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják, e nézetet maga az IPCC is megerősíti az AR5-ben. A fősodratú klímagazdaságtan felismerte, hogy a CO_2 miatti felmelegedésnek ugyan lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik az agresszív csökkentési szakpolitika indoklásához, és hogy a globális felmelegedés „megállítására" vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szint esetén is nagyobb kárt okozna, mintha nem tennénk semmit sem. Egy 2012-es nagy visszhangot kiváltó tanulmány megállapítása szerint a globális felmelegedés káros hatással lenne a szegény országok növekedésére, de e megállapítás később nem bizonyult megalapozottnak. A modellezési bizonytalanságokat teljes mértékben figyelembe vevő tanulmányok vagy nem találnak bizonyítékot a CO_2-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására vonatkozólag, vagy arra a következtetésre jutnak, hogy a szegény országokra ugyanúgy a javukra szolgál, mint a gazdagoknak.

A szén-dioxid (a „karbon") társadalmi költségére (SCC) vonatkozó becslés a jövőbeli gazdasági növekedés, a társadalmi-gazdasági folyamatok, a kamatlábak, az éghajlati károk és a rendszerreakciók ismeretlen tényezői miatt rendkívül bizonytalan. Az SCC nem mond semmiféle érdemi információt a klímaváltozás gazdasági vagy társadalmi hatásairól. Egy olyan indexet szolgáltat, amely az éghajlattal és a gazdasággal kapcsolatos feltételezések nagy hálózatait dollárértékekkel köti össze. Egyes feltételezésekből magas SCC-re következtetnek, míg másokból alacsony vagy negatív SCC adódik (azaz a kibocsátás társadalmilag hasznos). A kiindulási feltételezések melletti vagy elleni bizonyítékokat függetlenül kell megállapítani; az így kapott SCC semmiféle további információt nem ad e feltételezések érvényességéről. Billenőpontok lehetőségének figyelembevétele nem indokolja az SCC-becslések jelentős módosítását.

11.1 Klímaváltozás és gazdasági növekedés

11.1.1 Áttekintés

Régi megfigyelés, hogy a gazdaságok általában rosszul teljesítenek a nagyon hideg és a nagyon meleg régiókban, az optimum valahol a kettő között van (Nordhaus, 2006). Ez azt jelenti, hogy a felmelegedés káros lesz a forró régiókban, de előnyös a hidegekben. A hőmérséklet-érzékeny gazdasági tevékenység, amikor csak lehetséges, a legmegfelelőbb helyre vándorol, ahol a társadalom alkalmazkodik a helyi éghajlathoz. Részben ezekre a megfigyelésekre alapozva, 1992-ben Thomas Schelling, az Amerikai Gazdasági Társaság akkori elnöke azzal érvelt, hogy az éghajlatváltozásnak az Egyesült Államok gazdasági tevékenységére gyakorolt hatásai csekélyek lennének a sok más változáshoz képest, amelyek bekövetkeznének (Schelling 1992).

> … A gyártás ritkán függ az éghajlattól, és ahol korábban a hőmérséklet és a páratartalom befolyásolta a helyzetet, a légkondicionálás közbelépett. Amikor a Toyota Ohio, Alabama és Dél-Kalifornia közül választja ki egy autószerelő üzem helyszínét, a földrajzi szempontok fontosak, de nem az éghajlat miatt... A pénzügyeket kevéssé befolyásolja az éghajlat; hasonlóan az egészségügyhöz, az oktatáshoz vagy a műsorszóráshoz. A közlekedést befolyásolhatja, de az elmúlt 30 évben a minden időjárási körülmény között elérhető leszállás és felszállás terén elért fejlesztések nagyobbak, mint az éghajlat által okozott bármilyen különbség. Ha az átlagos hatás felmelegedés, a jeges vízi utak és a hóeltakarítás jelentősége csökkenhet.
>
> Az építőiparra hatással van, főként a hideg, és ha az átlagos hatás a felmelegedés irányába mutat, abból az építőipar kismértékben profitálhat.

> A változás valójában a mezőgazdaságot érinti. De még ha a mezőgazdasági termelékenység a következő fél évszázadban egyharmaddal is csökkenne, az egy főre jutó GNP-t, amelyet 2050-re elérhettünk volna, csak 2051-ben érnénk el. …
>
> Arra a következtetésre jutottam, hogy az Egyesült Államokban, és valószínűleg Japánban, Nyugat-Európában és más fejlett országokban a gazdasági teljesítményre gyakorolt hatás elhanyagolható lesz, és valószínűleg észre sem fogjuk venni.

Harminc évvel később maga az IPCC is gyakorlatilag ugyanezt a megállapítást tette az ötödik értékelő jelentésében (Arent et al. 2014, kiemelés tőlem).

> **A legtöbb gazdasági ágazatban az éghajlatváltozás hatása csekély lesz más tényezők hatásaihoz képest.** A népesség, az életkor, a jövedelem, a technológia, a relatív árak, az életmód, a szabályozás, a kormányzás és a társadalmi-gazdasági fejlődés számos egyéb oldalának változása a gazdasági áruk és szolgáltatások kínálatára és keresletére olyan mértékben fog hatással lenni, amely nagyban meghaladja az éghajlatváltozás hatását.

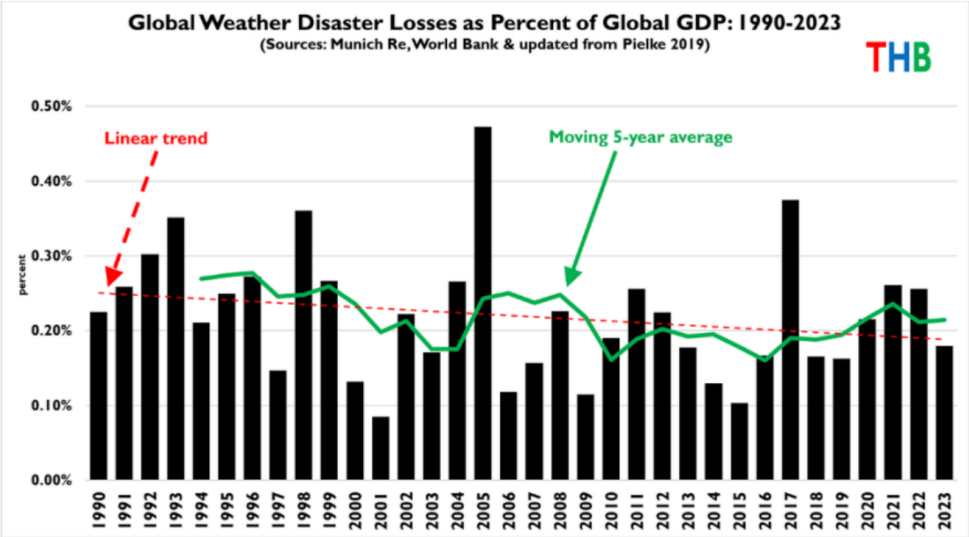
Az AR5 óta felhalmozott bizonyítékok nem változtatnak ezen az értékelésen. Mohaddes et al. (2023) megállapították, hogy a meleg időjárási sokkok kismértékben negatív hatással vannak az Egyesült Államok államszintű termelésére, de nem a jövedelemre, míg a hideg időjárási sokkok mindkettőre negatív hatással vannak, és a hatások körülbelül négyszer nagyobbak, ami azt jelenti, hogy a melegebb körülményekre való áttérés összességében nettó gazdasági hasznot hozna az Egyesült Államok számára.

Ezeket az állításokat a tapasztalatok is alátámasztják. 1900 óta az átlagos globális felszíni hőmérsékleti anomália 1,3°C-kal emelkedett, ami körülbelül annyi, amennyit az IPCC a következő évszázadban mérsékelt kibocsátási forgatókönyv szerint előre jelez. De ugyanakkor, amikor a Föld melegedett, és a népesség ötszörösére nőtt, az emberiség soha nem látott mértékben kezdett virágozni. Például a globális átlagos élettartam harminckét évről hetvenkét évre nőtt, az egy főre jutó gazdasági aktivitás hétszeresére nőtt, a szélsőséges időjárási események által okozott elhalálozási arány pedig ötvenedére zuhant. Az éghajlatváltozás miatti kárelőrejelzések jellemzően arról szólnak, hogy az emberiség életkörülményei mennyivel javulnak, és nem állítják azt, hogy abszolút értelemben rosszabb lesz (O'Neill 2023).

Bár a szélsőséges időjárási események költségesek, minden modern gazdaságban egyre kevésbé fontosak (Formetta és Feyen, 2019). 1990 óta az időjárással kapcsolatos katasztrófaveszteségek a globális GDP-hez viszonyítva csökkentek (Pielke Jr, 2018, 2020), akárcsak az elhalálozási kockázatok (Formetta és Feyen, 2019). A gazdasági időjárással kapcsolatos biztosítási kifizetések ugyan emelkednek, de ezt teljes mértékben magyarázza a gazdaság méretének és a biztosított eszközállomány értékének növekedése. A szélsőséges időjárási események számának korábbi növekedése nem gyakorolt jelentős (pozitív vagy negatív) hatást a biztosítótársaságok piaci értékére (Hu és McKitrick, 2015). A múltbeli szélsőséges időjárási eseményeknek sem volt jelentős hatásuk az amerikai bankok teljesítményére (Blickle et al., 2021); sőt, a felmelegedésről kimutatták, hogy a pénzügyi és biztosítási szektor számára előnyös (Mohaddes et al., 2023). Az alábbi 11.1. ábra szemléltető jellegű. Ezen okok miatt a közgazdászok régóta vonakodnak támogatni az éghajlatváltozás „megállítására" vagy akár az üvegházgáz-kibocsátás agresszív csökkentésére irányuló kísérleteket, mert a költségek nem érnék meg. Ahogy a klímapolitika közgazdaságtanának egyik kritikusa fogalmazott (Storm 2017):

> A mainstream klímagazdaságtan komolyan veszi a globális felmelegedést, de zavarba ejtő módon arra a következtetésre jut, hogy az optimális gazdaságpolitika az, ha szinte semmit sem teszünk ellene… A kontraszt feltűnő. Míg a klímatudomány hangos és világos üzeneteket küld arról, hogy a fosszilis tüzelőanyagok kivonását most kell elkezdeni, le

kell mondani a szénről és az olajról, és az erőforrásokat megújuló energiaforrásokból működő technológiai rendszerek felé kell irányítani, hogy a felmelegedést a 2°C-os határérték alatt tartsuk (IPCC 2014), a mainstream klímagazdaságtan azt állítja, hogy a túlságosan ambiciózus klímacélok szükségtelenül károsítják a gazdaságot, és az azonnali dekarbonizáció túl drága. A legtöbb klímagazdaságtan-szakértő ezért azt javasolja az emberiségnek, hogy csak várjon és figyeljen.



11.1. ábra: A globális időjárási veszteségek a GDP arányában. Forrás: Pielke Jr. (2023)

A mainstream közgazdaságtan álláspontját a klímapolitikai kérdésben legjobban az elmúlt három évtized integrált értékelési modelljeinek (IAM) az éghajlatváltozási politikával kapcsolatos eredményei képviselik, amelyekért William Nordhaus, a Yale Egyetem közgazdásza 2018-ban közgazdasági Nobel-emlékdíjat kapott. Az IAM-ek az éghajlati károk szimulálásának és az optimális politikai válasz értékelésének céljából gazdasági, éghajlati és társadalmi adatokat egyesít egységes keretrendszerbe (Resources for the Future, 2025). Nordhaus munkája általánosságban a mérsékelt globális klímapolitikát támogatta, az agresszív intézkedéseket nagyrészt a század végére halasztották. Nordhaus az 1990-es évek elején fejlesztette ki az úgynevezett Dinamikus Integrált Klíma- és Gazdaságmodellt (DICE) (Nordhaus, 1993), annak érdekében, hogy hosszú távon tanulmányozhassa a klímaváltozás, a klímapolitika és a globális gazdasági növekedés közötti kölcsönhatást. A DICE feltételezi, hogy a globális kibocsátás-szabályozás költségmentesen koordinálható, és azt a kérdést teszi fel, hogy mi legyen az optimális politikai cél. A DICE modell éghajlati komponense egyszerűsített klimatológiai modellezésen alapul. A DICE modell Nordhaus Nobel-díjjal való elismerése idején érvényes verzióját Nordhaus (2018) írta le; a CO_2-megduplázódás éghajlati érzékenységi paramétere 3,1°C volt, ami összhangban van az IPCC-jelentésekben szereplő legjobb becsléssel (3,0°C).

Az alap (klímapolitika nélküli) forgatókönyv mindössze 0,4 billió (T, trillion) dolláros globális kibocsátáscsökkentési költséggel jár, és 134,2 billió (trillion) dolláros globális klímakárt okoz, ami összesen 134,6 billió dolláros költséget jelent. A DICE klímamodell-komponense 2100-ra 4,1°C-os felmelegedést vetít előre az iparosodás előtti hőmérsékletekhez képest. Megjegyzendő, hogy ez becsült felmelegedés magasabb, mint számos IPCC klímamodellé.

Az optimális szakpolitikai forgatókönyv alig tér el a szokásos üzletmenet útjától. +3,5°C-os felmelegedést céloz meg, más szóval a fosszilis tüzelőanyagok használatát mérsékelten csökkentjük, és egyébként csupán együtt élünk szinte a teljes felmelegedéssel. Ez arra utal, hogy a CO_2-kibocsátás nagy része kevésbé káros, mint azok a politikák, amelyek a mérsékléséhez szükségesek lennének. A felmelegedés megakadályozására tett kísérletek költségei hamar meghaladják az előnyöket. A

felmelegedés 2,5°C-ra korlátozásának célkitűzése 177,8 billió dolláros összköltséget ad ki, ami 43,2 billió dollárral rosszabb, mintha semmit sem tennénk. Nordhaus nem értékelte a párizsi megállapodáshoz hasonló 1,5°C-os felmelegedési cél elérését, de az még költségesebb lenne.

A DICE későbbi kiadása a felmelegedésből eredő feltételezett károkat magasabb szinten veszi figyelembe, ami nem meglepő módon agresszívabb politikai ajánlásokhoz vezet, amint azt a szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségéről szóló alábbi szakaszban kifejtjük.

11.1.2 Az éghajlatváltozás és a gazdasági növekedés adatalapú elemzése

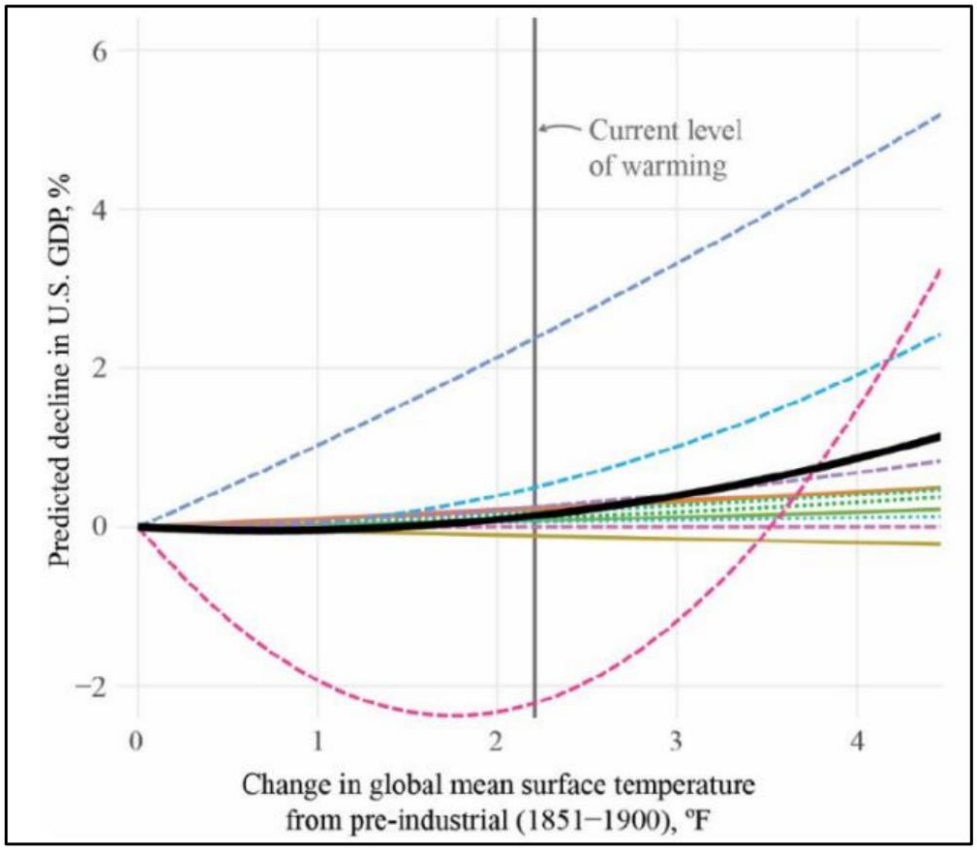
Számos más tanulmány éghajlatváltozás gazdasági növekedésre gyakorolt potenciális hatásának vizsgálatára az IAM-ek helyett atörténeti adatokra alkalmazott ökonometriai módszereket használt. Dell et al. (2012, a továbbiakban DJO12) egy nagyhatású tanulmány volt, ami egy több országra és a 1950 és 2005 közötti időszakra kiterjedő, nemzeti szintű adatokból álló panelt használt, amelyben az éghajlati és gazdasági adatokat a helyi rácscellák szintjétől a nemzeti szintig terjedő hőmérséklet átlagolásával párosították össze népességi súlyok segítségével. Azt találták, hogy a felmelegedés a gazdag országokban jelentéktelen pozitív hatással van a jövedelemnövekedésre, de a szegény országokban jelentős negatív hatással jár. Moore és Diaz (2015) módosították a DICE modellt, hogy figyelembe vegyék ezt a megállapítást, és arra a következtetésre jutottak, hogy a jövedelemkiesés időbeli összetett hatásai miatt a szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költsége drámaian magasabb értékét jelenti.

A későbbi nagyszámú szakirodalom vitatta a DJO12 megállapításainak robusztusságát. Burke et al. (2015) egy olyan globális panelt elemzett, amelynek átlaghőmérsékletei országos szintre voltak átlagolva, és azt találták, hogy a felmelegedés negatív hatással van a növekedésre mind a gazdag, mind a szegény országokban, amikor az országos átlaghőmérséklet meghaladja a 13°C-ot. Zhao et al. (2018) Nordhaus (2006) G-Econ adatkészletét használta, ami a gazdasági aktivitást rácscella-szintre bontja le, és a DJO12-típusú eredményeket ugyanazon az országcsoporton ismételték meg, mint amilyeneket a DJO12-ben használtak, de ezután kimutatták, hogy a teljes globális mintán a felmelegedés mind a gazdag, mind a szegény országokban fokozza a növekedést, bár az utóbbi csoportban a pozitív hatás ott jelentkezik, ahol a helyi hőmérséklet körülbelül 16°C alatt marad. Greβer et al. (2021) egy regionális gazdasági adatkészletet fejlesztettek ki a világ 1542 szubnacionális régiójára vonatkozóan a 2005 és 2015 közötti időszakra, és azt találták, hogy a hőmérsékletnek nincs hatása a növekedésre. Yang et al. (2023) frissítette a DJO12 adathalmazt, és a mintavételi gyakoriság vegyességével szemben robusztusan viselkedő becslőt alkalmazott. Megállapították, hogy bár a hőmérsékleti sokkok a jövedelmi szintre átmenetileg hatást gyakorolnak, a növekedési ütemre nézve nem volt jelentős és tartós következmény.

Newell et al. (2021) megjegyezte, hogy a szakirodalomban nincs olyan mögöttes elmélet, amely az ökonometriai modellspecifikációt irányítaná. Figyelembe véve a magyarázó változók önkényes megválasztását, több mint 800 lehetséges modellspecifikációt azonosítottak. Burke et al. (2015) adatait felhasználva egy olyan becslési módszert alkalmaztak, amely figyelembe veszi a modell bizonytalanságát, és megállapították, hogy a Burke et al. (2015) által preferált modellformát (ami a növekedésre nézve még a gazdag országokban is a felmelegedés negatív hatásait sugallta), az optimális modellkiválasztási algoritmus kifejezetten kizárja. Összességében nem tudtak kimutatni a GDP-re vagy a GDP-növekedésre gyakorolt hőmérsékleti hatást. A globális növekedésre gyakorolt hatás 95%-os konfidenciaintervallumát 2011-ra a túlzó RCP8.5 felmelegedési forgatókönyv szerint is −86 százaléktól +388 százalékig terjedően becsülték. Más szóval, a nettó hatás valószínűleg pozitív, de túl bizonytalan ahhoz, hogy megkülönböztethető legyen a nullától.

Barker (2023) bírálta azon DJO12-feltételezést, hogy az országokat évtizedekkel ezelőtti jövedelmük alapján rögzített „szegény” és „gazdag” kategóriákba lehet csoportosítani. Megjegyezte, hogy sok ország egykor szegény volt, de idővel meggazdagodott, és ha ezt figyelembe vesszük, a Dell et al. által jelentett eredeti hőmérsékleti hatások kicsivé és jelentéktelenné váltak.

Berg et al. (2023) azzal érvelt, hogy az országokat nem szabad nagyvonalúan gazdag/szegény kategóriákba csoportosítani, mert túl heterogének. Ehelyett országspecifikus hőmérsékleti válaszreakciós együtthatókat becsültek meg, majd a hasonló válaszreakciós együtthatókkal rendelkező országokat kis panelekbe csoportosították. Külön becsülték meg a globális és az egyedileg jellemző helyi hőmérsékleti sokkokra adott válaszokat, hogy jobban azonosítsák az éghajlati jelet az időjárási adatokban. Összességében azt találták, hogy a felmelegedés növekedésre gyakorolt negatív hatását tapasztaló országok száma meghaladta a pozitív hatásokat tapasztalókat, de csak átmenetileg: a hatások végül megfordulnak, így körülbelül kétszer annyi ország tapasztal nettó pozitív növekedési hatást. Azt is megállapították, hogy sokkal valószínűbb, hogy a globális hőmérséklet-változások (szemben a helyiekkel) inkább a szegény országok növekedését segítik elő, mint a gazdagokét. Egy 2100-ig tartó szimulációban, még a szélsőséges RCP8.5 forgatókönyvet alkalmazva is, kiszámolták, hogy az átlagos globális GDP-veszteség csak 1,9 százalék lenne a felmelegedés nélküli forgatókönyvhöz képest. Vagyis a gazdaság 400 százalékos növekedése helyett 392 százalékkal növekedne. Nordhaus korábbi elemzésének következménye, hogy a felmelegedés megakadályozására tett kísérletek jóval kevesebb, mint 392 százalékos növekedéshez vezetnének. Összefoglalva, a közgazdászok a klímát viszonylag jelentéktelen tényezőnek tartják a gazdasági növekedésben, ezt a nézetet maga az IPCC is megerősíti az ötödik értékelő jelentésében. A klímagazdaságtan főáramlatai felismerték, hogy a CO_2 által okozott felmelegedésnek lehetnek negatív gazdasági hatásai, de ezek túl kicsik ahhoz, hogy az agresszív csökkentési politikát igazolni lehessen, és a globális felmelegedés „megállítására” vagy korlátozására tett kísérlet még a párizsi célkitűzést jóval meghaladó szinten is rosszabb lenne, mint a semmittevés. Egy nagyhatású 2012-es tanulmány azt sugallta, hogy a globális felmelegedés károsítaná a szegény országok növekedését, de a megállapítás később nem bizonyult megbízhatónak (Tol 2024). Azok a tanulmányok, amelyek teljes mértékben figyelembe veszik a modellezési bizonytalanságokat, vagy nem találnak bizonyítékot a CO_2-kibocsátás globális növekedésre gyakorolt negatív hatására, vagy úgy találják, hogy a szegény országok ugyanolyan valószínűséggel profitálnak belőle, mint a gazdag országok.



11.2. ábra: Az Egyesült Államok GDP-jének csökkenése a felmelegedés foka szerint. Forrás: CEA-OMB (2023)

A Biden-kormányzat csendben tudomásul vette azt a várakozást, hogy a jelentős globális felmelegedés kis hatással lesz az amerikai gazdaságra, még akkor is, amikor az elnök klímavészhelyzetet hirdetett. A 2023-as CEA-OMB jelentésből származó 11.2. ábra az amerikai GDP várható csökkenését mutatja a hőmérséklet-emelkedés függvényében. A színes vonalak egy tucatnyi lektorált publikált tanulmány eredményeit mutatják, míg a folytonos fekete vonal ezek átlagát. Az adatot úgy lehetne összefoglalni, hogy „néhány százalékos hatás néhány fokos felmelegedés esetén". Tekintettel arra, hogy a gazdaság éves növekedési üteme várhatóan 1-2 százalék lesz, a melegedő földgömb hatása az amerikai GDP-re valóban elhanyagolható.

11.2 Modellek a szén-dioxid társadalmi költségére (SCC)

A szén-dioxid társadalmi költsége (SCC) a szén-dioxid-kibocsátás gazdasági hatásának számszerűsítésére használt eszköz, amely segít a politikai döntéshozóknak mérlegelni a klímapolitikák költségeit és előnyeit. Becslést ad arra a kárra, amit egy tonna CO_2 többlet kibocsátása okoz, dollárban kifejezve. Formálisabban fogalmazva, az SCC a légkörbe jutó további CO_2-mennyiség miatti jelenlegi és jövőbeli gazdasági jóléti marginális veszteség diszkontált jelenértéke.

11.2.1 Az SCC becslése

Bár a szakirodalom az SCC „becsléseire" hivatkozik, azt nem úgy becsülik meg, ahogyan más gazdasági statisztikákat becsülnek. Például a piaci tranzakciókra vonatkozó adatok, beleértve az árakat és a mennyiségeket, felhasználhatók a jelenlegi inflációs ráta vagy az egy főre jutó reál GDP növekedési ütemének becslésére, és ezekhez a mennyiségekhez jól ismert bizonytalanságok tartoznak.

De nincsenek olyan piaci adatok, amelyekkel mérni lehetne a CO_2-kibocsátással feltételezett marginális károk vagy előnyök nagy részét (a legtöbbjét), ezért ezeket gazdasági modellek segítségével kell figyelembe venni.

Például egyes SCC-számítások befolyásoló eleme a szélsőséges időjárás miatti jövőbeni halálozási kockázat változásával járó észlelt társadalmi költség. Nincs olyan piac, ahol az emberek közvetlen árat rendelhetnének ehhez a kockázathoz. A közgazdászok legjobb esetben is megpróbálhatják kikövetkeztetni ezeket az értékeket a kapcsolódó piacokon, például ingatlanpiacon vagy biztosításokon lebonyolított tranzakciók vizsgálatával, de az árváltozásoknak és a légköri CO_2-szintnek tulajdonítható hatások elkülönítése nagyon nehéz.

A közgazdászok az SCC-t IAM-mal (integrált értékelési modellekkel) számítják ki. A két legismertebb a Bizonytalanság, Negatívum és Elosztás Éghajlati Keretrendszere (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution, „FUND", Tol 1997) és Nordhaus DICE modellje. Az EPA (2023) újabban továbbiakat vezetett be. Az IAM-ek egy „kárfüggvényt" vagy függvénykészletet ágyaznak be, amely a környezeti hőmérsékletet hozzákapcsolja a helyi gazdasági viszonyokhoz. A kárfüggvénybe ágyazott feltételezések nagymértékben meghatározzák a kapott SCC-t. Az IAM-ek hosszú távú diszkontrátát is feltételeznek, vagy – mint a DICE-ban – a megoldás részeként kiszámítják az optimális belső diszkontrátát.

A kárfüggvény kidolgozásának egyik megközelítése az, hogy a világ országainak egyes ágazataiban a felmelegedés költségének (vagy hasznának) becslésével kezdik, és ezeket összesítik egy globális összegre. Ezt a megközelítést alkalmazták a FUND-ban is. Alternatív megközelítést jelent egy egyszerű egyenlet kidolgozása, ami a globális jövedelmet az átlagos globális hőmérséklet egyszerű kvadratikus függvénye szerint bünteti. Ezt a megközelítést alkalmazták a DICE modellben. A FUND modell esetében több száz paramétert kellett kiválasztani, míg a DICE modellben csak hármat. E hármat választották ki ahhoz, hogy a globális kibocsátáshoz 3°C-os felmelegedéstől kezdődően egy előre meghatározott büntetést (1,2%) rendeljenek, egy kvadratikus taggal, amely azt jelenti, hogy a károk a globális átlaghőmérsékleti anomália négyzetével arányosan nőnek. Barrage és Nordhaus (2024) a közelmúltban megváltoztatták a paramétereket, és a büntetést 3°C-on 1,6%-ra növelték, valamint 3°C-os felmelegedésnél további 1,0 százalékos GDP-büntetést adtak hozzá, hogy figyelembe vegyék a „fordulópontokat" (a felmelegedési küszöb átlépése által kiváltott hirtelen, nagyléptékű környezeti változásokat), valamint egy 0,5 százalékos „ítéleti korrekciót" a 3°C-os felmelegedés esetén kizárt hatásokra Nem meglepő módon a DICE újabb verziója sokkal magasabb SCC-becslést generál, mint korábban.

A becslés és a bizonytalanság fogalmai nem alkalmazhatók azonnal az egyensúlyi klímaváltozás (SCC) számításaira. Semmilyen mennyiségű adatgyűjtés nem változtathat azon a tényen, hogy az SCC számos összetevője ismeretlen, és az éghajlatváltozás fizikai hatásairól szóló mögöttes szakirodalom ismeretén alapuló megítélésen és véleményen alapul. Az SCC-számításokat ezért legjobb „ha-akkor" állításoknak tekinteni: ha a következő feltételezések teljesülnek, akkor az SCC tonnánként X dollárt jelent. A „ha" állítások listája tartalmazza azt a feltételezést, hogy a világ éghajlata és gazdasága az IAM-ben leírtak szerint működik. Ennek egyik lehetséges oka a felmelegedés időzítése. Minden IAM feltételez az egyensúlyi klímaérzékenységre (ECS) egy olyan értéket, amely a CO_2-kibocsátásból eredő felmelegedés mértékét szabályozza, és szabadon változtatható az ECS-sel kapcsolatos bizonytalanságokkal társított SCC-értékek eloszlásának létrehozása céljából. De ahogy Roe és Baumann (2013) rámutattak, az egyensúlyi idő az ECS négyzetével nő, így az ECS-paraméter felfelé történő módosítása a beállítási folyamat megfelelő lassítása nélkül torz jelenérték-kárbecsléseket okozhat. Különösen a felmelegedés néhány gyakran használt ECS-eloszláshoz kapcsolódó felső tartománya, ami fizikailag még ezer év múlva is lehetetlen (Roe és Baumann 2013), egy IAM-ben mégis néhány évszázadon belül megvalósulna. Az ECS és az egyensúlyi idő összehangolásának elmulasztása az SCC értékének túlbecsléséhez vezet.

11.2.2 Az SCC változásai

Az IAM-számítás minden szintje feltételezéseket tartalmaz, némelyik befolyásosabb, mint mások. A főbb feltételezések a következők:

• A diszkontráta: Az éghajlati károk hosszú időhorizonton halmozódnak fel, és az egy-két évszázaddal későbbi költségeket a jelenre kell diszkontálni. Minél magasabb a diszkontráta, annál kisebb a jövőbeni károk jelenértéke, és fordítva. A diszkontráta a pénz ma történő elköltésének alternatív költségét jelenti ahelyett, hogy befektetnénk, majd holnap többet költenénk. Egyes közgazdászok az SCC-számításokban nagyon alacsony diszkontráták alkalmazása mellett érvelnek, ami olyan politikai ajánlásokhoz vezetett, amelyek a CO_2-kibocsátás csökkentésébe történő viszonylag nagy azonnali beruházásokat részesítik előnyben. A hátránya, hogy más beruházások potenciálisan nagyobb megtérülést hozhatnak a társadalom számára.

• Egyensúlyi klímaérzékenység: Az IAM-ek az IPCC útmutatásait követve szokásosan 3,0°C vagy 3,1°C értéket alkalmaztak. A legfrissebb, adatalapú ECS-értékek általában ennél alacsonyabbak (lásd a 4. fejezetet). Dayaratna et al. (2017, 2020, 2023) kimutatták, hogy az alacsonyabb, empirikusan származtatott ECS-értékek használata drámaian csökkenti a kapott SCC-becslést, még alacsony diszkontráták alkalmazása esetén is.

• Kárfüggvény-együtthatók: Az IAM-ek feltételezik, hogy a CO_2 és a felmelegedés nettó károkozók, és a károk a hőmérséklettel exponenciálisan nőnek. Az újabb IAM-ekbe a feltételezett potenciális éghajlati fordulópontok hatásait is beépítették. A FUND modell korlátozottan, de explicit módon figyelembe vette a CO_2-trágyázás hatásait a mezőgazdaságban. Mivel az együtthatókat a globális zöldülés jelenlegi bizonyítékainak és a megnövekedett CO_2-szintből a növényekre gyakorolt előnyök nagyságának közzététele előtt választották ki (lásd a 2. és 9. fejezetet), a növekedési hatásokat valószínűleg alábecsültek. A DICE modell (és mások) nem tartalmaztak explicit módon semmilyen CO_2-trágyázási előnyt, kivéve, ha azt a kárfüggvény-együtthatók kiválasztásakor a felhasznált szakirodalomban figyelembe vették. A FUND kárfüggvénye tartalmaz egy olyan régiót, amelyben az alacsony felmelegedés számos régióban nettó előnyöket eredményez, e megállapítást alátámasztják a felmelegedés és növekedés ökonometriai modelljei (Berg et al. 2023), valamint a mezőgazdasági változások ökonometriai szimulációi (McKitrick 2025). A DICE kárfüggvény - felépítéséből adódóan - bármilyen felmelegedési szinten kizárja a nettó előnyöket.

• Emissziós forgatókönyvek: Az IAM-ok olyan SCC-becsléseket generálnak, amelyek a meglévő CO_2-koncentráció emelkedésével nőnek. Következésképpen a károk értéke az évszázad későbbi szakaszában magasabb lesz, az elkövetkező évtizedekben feltételezett alapkibocsátásoktól függően.

Néhány integrált modell (mint például a DICE) tartalmazza a CO_2-kibocsátáscsökkentés gazdaságra gyakorolt költségeit, hogy meghatározzon egy optimális növekedési pálya menti SCC-t. Ha a CO_2-kibocsátás csökkentését olcsónak feltételezzük, akkor a modell arra a következtetésre jut, hogy az optimális politikának a nagyobb kibocsátáscsökkentésre kell törekednie, és fordítva.

Informatív megállapítás, hogy az SCC eredményei invariánsak-e bizonyos feltételezések változásaival szemben. De, amikor különféle feltételezések magasabb vagy alacsonyabb SCC-értékeket eredményeznek, az SCC-érték változása nem szolgáltat elsődleges bizonyítékot a feltételezések érvényességére. Például 2023-ban az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége körülbelül ötszörösére emelte az általa preferált SCC-értéket a tíz évvel korábban kiadott becslésekhez képest. Ez nem azért van, mert új adatokat gyűjtöttek, vagy jobb matematikai módszereket találtak fel, hanem azért, mert új feltételezéseket alkalmaztak, és ezeknek a feltételezéseknek az érvényessége mindettől független kérdés. Az EPA (2023) 81. oldalán található táblázatok azt mutatják, hogy ha a korábbi elemzésekhez hasonló feltételezéseket alkalmaztak volna, az eredmények nem különböztek volna lényegesen a korábbiaktól. Az egyik új feltételezésük az volt, hogy Moore et al. (2017) elemzése alapján a globális mezőgazdasági károk a korábban véltnél jóval nagyobbak. De ahogy a 9. fejezetben

tárgyaltuk, McKitrick (2025) kimutatta, hogy Moore et al. (2017) egy olyan adatbázist használt, amelyben a CO_2-változási megfigyelések fele hiányzott. Amikor a lehető legtöbb megfigyelést újra figyelembe vették a rendelkezésre forrásokból, és az elemzést megismételték, a várható terméshozam-veszteségek eltűntek, és minden felmelegedési szinten nyereséggé alakultak. Ezért az EPA SCC-felülvizsgálatában a mezőgazdasági terméshozamnak tulajdonított veszteséggel foglalkozó rész alaptalan volt.

11.2.3 Alacsony SCC-re vonatkozó bizonyítékok

A 2. fejezet áttekintette a klímaváltozással és a zöldítéssel kapcsolatos bizonyítékokat, a 9. fejezet pedig az éghajlatváltozást és az amerikai mezőgazdaságot vizsgálta. A bizonyítékok azt mutatják, hogy a CO_2-trágyázás sokkal jótékonyabb hatással van a mezőgazdaságra, mint azt akkoriban tudták, amikor az olyan IAM-eket, mint a DICE és a FUND paraméterezték. Haverd et al. (2020) azt találta, hogy a megfigyelt CO_2-trágyázási arány majdnem kétszerese volt a termésmodellek által előre jelzettnek. Dayaratna et al. (2023) Lewis (2022) frissített - modern műszeres és paleoklíma-hőmérsékleti adatokat asszimiláló - empirikus ECS-eloszlásbecslését használta, és a FUND modellben 30 százalékos CO_2-trágyázási haszonnövekedést vette figyelembe. Úgy találta, hogy 2050-re a medián SCC még alacsony, 2,5 százalékos diszkontráta mellett is mindössze 18,67 dollár, a valódi érték 24 százalékos valószínűséggel negatív. Öt százalékos diszkontráta mellett a medián SCC-érték a 2040-es évek közepéig negatív, 2050-ben pedig csak 0,37 dollár volt, 49 százalékos valószínűséggel negatív. Így ésszerű feltételezések mellett a frissített tudományos adatokat használó mainstream IAM olyan bizonyítékot szolgáltat, amely alátámasztja azt, hogy az SCC nem szignifikánsan nagyobb nullánál.

Azt is meg kell jegyezni, hogy az SCC a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származó CO_2-kibocsátás társadalmi költségeire összpontosít. Nem célja a fogyasztók és a társadalom számára a fosszilis tüzelőanyagok elérhetőségéből származó magán-határhasznok mérése. A lakosság hajlandósága arra, hogy bármilyen típusú üzemanyagért fizessen, a megbízható, bőséges fosszilis energia társadalmi értékét jelzi. Tol (2017) becslése szerint a szén-dioxid egyéni haszna a társadalmi költségekhez képest nagy. Szemléltetésül: egy gallon benzin ára az üzemanyag fogyasztója számára jelentkező határértékét jelzi. Tegyük fel, hogy a szén-dioxid társadalmi költségét viszonylag magasnak tekintjük, mondjuk tonnánként 75 dollárnak. Deflálva egy 1,5-ös MCPF[4] értékkel, ami tonnánként 50 dolláros szén-dioxid-adót eredményezne, benzin esetén megfelelne 44 cent/gallonnak (Lavelle, 2019). A adózás előtti 3,00 dollár/gallon ár azt jelentené, hogy az üzemanyag társadalmi határköltsége közel hétszerese a társadalmi határköltségnek.

11.2.4 Fordulópontok

Az SCC-számítások jellemzően a melegedő éghajlat fokozatos hatásait veszik figyelembe, mint például a lassan olvadó gleccserek és az emelkedő átlaghőmérséklet. A szén-dioxid-kibocsátás társadalmi költségének (SCC) potenciálisan magas értékeiben az egyik mozgatórugó a hirtelen változásokhoz kapcsolódó hirtelen katasztrofális következmények bevezetése a modellekbe (Dietz et al., 2021). Ezeket gyakran nevezik „fordulópontoknak” vagy billenőpontoknak.

A „fordulópont” kifejezés két eltérő fizikai fogalmat ötvöz, amelyek különféle kutatási kihívásokat jelentenek. Sok fizikai rendszer eredendően stabil, hacsak nem hat rá elegendően nagy külső energia. Például egy jégsapka széles hőmérsékleti tartományban érintetlen maradhat, de amint a hőmérséklet átlépi a 0°C-os küszöböt, elolvad. Az ilyen hirtelen átmenetek mindenütt jelen vannak a természetben, és külső erőt igényelnek. Az, hogy az erőnek a rendszer méretéhez képest nagynak kell-e lennie, a rendszer mögöttes stabilitásától függ.

[4] A közpénzek határköltsége: az optimális szén-dioxid-adóhányad az SCC osztva az MCPF-vel (Sandmo 1977).

Egy másik típusú fordulópontnak a neve bifurkáció, ami a nemlineáris rendszerek belső dinamikájának tanulmányozásából származik (Crawford, 1991). Számos rendszerről megfigyelték, hogy egynél több egyensúlyi ponttal rendelkezik, amelyek között minimális külső befolyással vagy akár anélkül is átmozdulhat. Például egy időjárási rendszernek két különböző egyensúlyi állapota lehet: az egyikben szélcsend van, a másikban pedig tornádó. Az egyikből a másikba való átmenet külső erőhatás nélkül vagy apró változással is megtörténhet, például a közmondásos pillangó szárnycsapásával (Shen et al. 2014). A „fordulópont" kifejezést néha az ilyen típusú bifurkációra használják, ami magában a rendszerben rejlő, külső erőktől nem feltétlenül függő instabilitást sugall. Ehelyett a rendszer paramétereitől függ, amelyek olyan értékeket vesznek fel, amelyek alátámasztják a bifurkációk kialakulását (Crawford, 1991).

A két eltérő koncepció különböző kutatási kérdéseket vet fel. Az elsővel kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy az éghajlati rendszer összetevői kellően nagy antropogén kényszer hatására érzékenyek-e hirtelen változásokra. A másodikkal kapcsolatban arra vagyunk kíváncsiak, hogy a Föld éghajlati rendszerének vannak-e olyan eredendő bifurkációi, amelyek külső kényszer hatására vagy anélkül hirtelen átmeneti lehetőséget jelenthetnek.

Olyan modelleket fejlesztettek ki, amelyek arra utalnak, hogy a második típus is lehetséges. Kypke et al. (2020) egyszerű éghajlati modelljében az üvegházgáz-koncentráció egyike azon paramétereknek, amelyek az arktiszi éghajlat olyan bifurkációinak kialakulását szabályozza, amelyben hideg és meleg egyensúly is lehetséges. Ha kellően magas üvegházgázkényszert és kellően magas óceáni hőszállítási sebességet hoznak létre, akkor lehetővé válik a bifurkáció. Általánosabb megfigyelés szerint a globális klímaváltozási rendszerek bifurkációkat és többszörös egyensúlyokat tartalmaznak (Brunetti és Ragon, 2023).

A bifurkációk esetleges létezése a Föld éghajlati rendszerében azt jelenti, hogy hirtelen átmenetek lehetségesek, nemcsak nagy kényszerítésekre, hanem kis perturbációkra is. Ez a fordulópontokat az olyan alacsony valószínűségű és potenciálisan katasztrofális események kategóriájába sorolja, mint például egy nagy meteorbecsapódás. Kulcsfontosságú kérdés, hogy vajon az ilyen típusú fordulópontok előre jelezhetők-e. A jelenlegi kutatások nem oldották meg ezt a kérdést (Dakos et al., 2024), és valószínűleg nem is lesznek képesek rá, mivel a „pillangóhatás" egyik következménye, hogy a nemlineáris rendszerekben kiszámíthatósági határok létezésnek (Palmer et al., 2014). Ezért nem nyilvánvaló, hogyan lehet ezeket a lehetőségeket beépíteni az SCC-számításokba. A feltételezések kis eltérései a kapott SCC-ben önkényesen nagy eltérésekhez vezetnek, és nincs alapunk választani közöttük. Ha ilyen fordulópontok lehetségesek, a gazdaságpolitika legmegfelelőbb álláspontja a külső katasztrófákkal szembeni ellenálló képesség maximalizálása, mivel nem valószínű, hogy meg tudnánk jósolni, vagy meg tudnánk akadályozni a bekövetkezést. Az AR6 (WGI, 1. fejezet) főként az első típusú fordulópontra összpontosít, nevezetesen a külső kényszerre adott hirtelen változásra. Ez a jelentés jár együtt a „fordulópont" fogalmának népszerű használatával is az éghajlatváltozással kapcsolatos vitákban (lásd például itt: https://report-2023.global-tipping-points.org/what-is-a-tipping-point/). Ahogyan az AR6 összefoglalja, a paleoklíma-adatokban vannak hirtelen változásokra utaló jelek, és ezek közül néhányat fordulópontként értelmeztek. Egyes földrendszer-modellekkel végzett előrejelzések olyasféle fordulópontokat adtak ki, mint például az amazonasi erdők pusztulása a CO_2-koncentráció, illetve a hőmérséklet meghatározott értékére etörténő emelkedése esetén.

Éghajlati fordulópontokat övező riadalom tükröződik a Globális Fordulópontokról szóló 2023. december 6-án a COP28 konferencián közzétett jelentésben (Lenton et al., 2023). A jelentés az éghajlati rendszer több mint 25 olyan részét azonosítja, amelyekről azt mondják, hogy fordulópontokat alkotnak. Amit éghajlati „fordulópontnak" minősítenek, az egy mozgó célpont. A szakirodalomban és az értékelő jelentésekben szereplő leggyakoribb példák közé tartozik a grönlandi jégtakaró szétesése, a nyugat-antarktiszi jégtakaró szétesése, az északi-sarki tengeri jég nyári eltűnése, az amazonasi esőerdők elpusztulása, a korallzátonyok pusztulása, az örökfagy és a metánhidrátok felengedése, az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása, a boreális erdők eltolódása, a nyugat-afrikai monszun eltolódása és az indiai monszun eltolódása.

Minden efféle fordulóponthoz bizonyos fokú rendszerinstabilitás szükséges, hogy felmelegedésre hirtelen átmenetet mutatkozzon. Emiatt úgy tűnik, nagyon kevés különbséget lehet tenni a fordulópont és a természetes éghajlati változékonyság között. A természetes éghajlati változékonyság a múltban eltolódásokat okozott a nyugat-afrikai és indiai monszunokban, pusztítást az amazonasi erdőkben és a korallzátonyokban, valamint szétesést a grönlandi és a nyugat-antarktiszi jégtakarók egyes részeiben. E hatások a természetes éghajlati változékonyság és az ökoszisztéma-válaszok évtizedes és évszázados időléptékeiben mind visszafordíthatók.

Súlyosabb következmények lehetőségét hordozza néhány olyan hirtelen lehetséges változás, mint a nyugat-antarktiszi jégtakaró összeomlása és az atlanti meridionális átfordulási cirkuláció (AMOC) összeomlása. Az AR6 WG1 politikai döntéshozóknak szóló összefoglalója szerint:

> Az Atlanti Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) a 21. században minden kibocsátási forgatókönyv esetén nagy valószínűséggel gyengülni fog. Míg a 21. századi csökkenést *nagy valószínűséggel* valószínűsítik, a trend nagyságrendjét illetően csak *alacsony* a bizalom. *Közepes a bizalom* abban, hogy 2100 előtt nem lesz hirtelen összeomlás. (C.3.4)
>
> Korlátozott bizonyítékok szerint bekövetkezhetnek kis valószínűségű, nagy hatású kimenetelek (amilyeneket pl. mély bizonytalansággal jellemzett, egyes esetekben fordulópontokat is érintő jégtakaró-instabilitási folyamatok okoznak), amelyek magas ÜHG-kibocsátású forgatókönyvek (pl. SSP5-8.5) esetén évszázadokra jelentősen növelnék az antarktiszi jégveszteséget. (B.5.2)

SCC-számítások esetében az ilyen típusú fordulópont által implikált kutatási kérdés az, hogy vajon megfigyeltek-e már efféle eseményeket a múltban a jelenleg tapasztalthoz hasonló éghajlati körülmények között, vagy a közeljövőben fognak-e ilyet észlelni. Az AR6 kevés bizonyítékot talál az Atlanti-óceáni Meridionális Átfordulási Cirkuláció (AMOC) vagy a Nyugat-Antarktiszi jégtakaró közelgő összeomlására. Megállapítja viszont, hogy az Északi-sarki tengeri jéghez nem kapcsolódik fordulópont (AR6 Műszaki Összefoglaló, 76. o.)

Dietz et al. egy SCC-modellbe számos potenciális fordulópontot (hirtelen változást) épített be. Úgy találták, hogy körülbelül 25 százalékkal emelték a becslést, főként az örökfagy olvadásával és a metánhidrátok felszabadulásával összefüggésben. Az IPCC azonban ezt a forgatókönyvet nagyon valószínűtlennek tartja (AR6 Technikai Összefoglaló, 107. o.).

Összefoglalva, következhetnek be a természetes éghajlati folyamatokhoz kapcsolódó ismeretlen bifurkációs fordulópontok, de ez a lehetőség nem fordítható le konkrét útmutatásként az SCC-re vonatkozóan. Előfordulhatnak a felmelegedés következményeként a klímarendszerben potenciálisan hirtelen változási pontok, bár az IPCC a legtöbbhöz, beleértve a legnagyobbakat is, alacsony valószínűséget rendel. Ha mindezeket figyelembe vesszük, eredményül azt kapjuk, hogy az SCC értéke a 21. században csak szerény mértékben nő.

11.2.5 Vannak-e alternatívák?

Egyre inkább azt állítják, hogy az SCC-ben túlságosan nagy változások vannak ahhoz, hogy az hasznos legyen a politikai döntéshozók számára. A Cambridge Econometrics (Thoung, 2017) kijelentette, hogy a bizonytalanságok miatt „itt az ideje kinyírni". Az Egyesült Királyság és az EU már nem használja az SCC-t a szakpolitikai értékeléshez, és a „célokkal konzisztens" szén-dioxid-árazást választja (UK Department for Energy Security and Net Zero 2022, Dunne 2017). Az SCC-becslések bizonytalansága azonban nem jelenti azt, hogy az egyéb szabályozási eszközök eredendően jobbak vagy hatékonyabbak lennének. Számos kibocsátási szabályozás (például az elektromos járművekre vonatkozó előírások, a megújuló energiaforrásokra vonatkozó előírások, az energiahatékonysági előírások és bizonyos típusú háztartási gépek tilalma) tonnánként sokkal nagyobb

kibocsátáscsökkentési költséget okoz, mint bármely általános SCC becslés, ami elegendő annak megállapításához, hogy a költség-haszon tesztnek egyikük sem felel meg.

Hivatkozások

AR6: Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (2021) Working Group I Contribution. www.ipcc.ch.

Arent, D.J., R.S.J. Tol, E. Faust, J.P. Hella, S. Kumar, K.M. Strzepek, F.L. Tóth, and D. Yan (2014) Key economic sectors and services. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659-708.https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf

Barker, D. (2023) Temperature Shocks and Economic Growth: Comment on Dell, Jones, and Olken. Econ Journal Watch 20(2) 234-253 https://econjwatch.org/articles/temperature-shocks-and-economic-growth-comment-on-dell-jones-and-olken

Barrage, Lint and William Nordhaus (2024) Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model. Proceedings of the National Academy of Sciences 121 (13) e2312030121 https://doi.org/10.1073/pnas.2312030121

Berg, Kimberly, Chadwick C Curtis and Nelson Mark. (2021) GDP and temperature: Evidence on cross-country response heterogeneity. NBER Working Paper 31327 June 2023 http://www.nber.org/papers/w31327

Blickle, Kristian; Sarah N. Hamerling, and Donald P. Morgan (2021) : How bad are weather disasters for banks?, Staff Reports, No. 990, Federal Reserve Bank of New York, New York, NY https://www.econstor.eu/bitstream/10419/247913/1/sr990.pdf

Brunetti, Maura and Charline Ragon (2023) Attractors and bifurcation diagrams in complex climate models. Physical Review E 107 054214 https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.107.054214

Burke, Marshall, Solomon M Hsiang, and Edward Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. Nature, 527(7577):235–239.

Council of Economic Advisors-Office of Management and Budget (CEA-OMB 2023) Methodologies and considerations for integrating the physical and transition risks of climate change into macroeconomic forecasting for the president’s budget. March 13, 2023. https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf

Crawford, John D (1991) Introduction to Bifurcation Theory. Reviews of Modern Physics 63(4) October 1991 991—1037.

Dakos, Vasilis, Chris Boulton, Joshua Buxton et al. (2024) Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. Earth System Dynamics 15 1117—1135 https://doi.org/10.5194/esd-15-1117-2024

Dayaratna, Kevin and Ross McKitrick (2023) "Reply to comment on “climate sensitivity, agricultural productivity and the social cost of carbon in fund” by Philip Meyer" Environmental Economics and Policy Studies 2023 link.springer.com/article/10.1007/s10018-023-00364-2

Dayaratna, Kevin, Ross McKitrick and David Kreutzer (2017) Empirically-Constrained Climate Sensitivity and the Social Cost of Carbon. Climate Change Economics April 2017 DOI: http://dx.doi.org/10.1142/S2010007817500063

Dayaratna, Kevin, Ross McKitrick and Patrick J. Michaels (2020) Climate Sensitivity, Agricultural Productivity and the Social Cost of Carbon in FUND. Environmental Economics and Policy Studies https://doi.org/10.1007/s10018-020-00263-w

Dell, Melissa, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. American economic journal: Macroeconomics, 4(3):66–95, 2012. ISSN 1945-7707.

Dietz, S., J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner (2021) Economic impact of tipping points in the climate system. Proceedings of the National Academy of Science 2021 Vol. 118 No. 34 e2103081118

Dunne, Daisy (2017), "Q&A: The Social Cost of Carbon," Carbon Brief, February 14, 2017, https://www.carbonbrief.org/qa-social-cost-carbon/

Formetta, Giuseppe and Luc Feyen (2019) Empirical evidence of declining global vulnerability to climate-related hazards. Global Environmental Change 57 101920 https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.004

Greβer, Christina, Daniel Meierrieks, and David Stadelmann (2021) The link between regional temperature and regional incomes: econometric evidence with sub-national data. Economic Policy, 36(107):523–550, 2021.

Haverd, V., Raupach, M., Briggs, P., et al. (2020). Higher than expected CO_2 fertilization inferred from leaf to global observations. Global Change Biology, 26, 2390–2402.

Hu, Bin and Ross McKitrick (2015) Climatic Variations and the Market Value of Insurance Firms. Journal of Insurance Issues Vol. 39, No. 1, pp. 92-111 https://www.jstor.org/stable/43741103

Kypke, K. L., Langford, W. F., and Willms, A. R.: Anthropocene climate bifurcation, Nonlinear Processes in Geophysics, 27, 391–409, https://doi.org/10.5194/npg-27-391-2020, 2020.

Lavelle, Marianne (2019) Carbon Tax Plans: How They Compare and Why Oil Giants Support One of Them. Inside Climate News March 7, 2019 https://insideclimatenews.org/news/07032019/carbon-tax-proposals-compare-baker-shultz-exxon-conocophillips-ccl-congress/

Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, et al. (eds) (2023) The Global Tipping Points Report 2023. University of Exeter, Exeter, UK. https://report-2023.global-tipping-points.org/

Lewis, N., (2013) An objective Bayesian, improved approach for applying optimal fingerprint techniques to estimate climate sensitivity. Journal of Climate, 26, 7414-7429. https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00473.1

McKitrick, Ross R. (2025) Extended Crop Yield Meta-analysis Data do not Support Upward SCC Revision. Scientific Reports 15 article 5575 https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2

Mohaddes, Kamiar, Ryan Ng., Hashem Psaran, Mehdi Raissi and Jui-Chung Yang (2023) Climate change and economic activity: evidence from US states. Oxford Open Economics Vol 2 odac010 https://doi.org/10.1093/ooec/odac010

Moore, Frances C. and Delavane B. Diaz (2015) Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. Nature Climate Change, 5(2):127–131, 2015. ISSN 1758-678X.

Moore FC, Baldos U, Hertel T, Diaz D (2017) New science of climate change impacts on agriculture implies higher social cost of carbon. Nature Communications 8:1607. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01792-x

Newell, Richard G., Brian C. Prest, and Steven E. Sexton (2021). The GDP-temperature relationship: Implications for climate change damages. Journal of Environmental Economics and Management, 108 https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102445

Nordhaus, William (2006). Geography and macroeconomics: New data and new findings. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(10):3510–3517, 2006. ISSN 0027-8424.

Nordhaus, William. (2018) Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. American Economic Journal: Economic Policy August 2018, 10(3): 333-360. https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/pol.20170046

Nordhaus, W. (1993) Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the "DICE" Model American Economic Review Vol. 83, No. 2, (Papers and Proceedings) pp.313-317.

O'Neill, Brian C. (2023) Envisioning a future with climate change. Nature Climate Change 13, pages 874–876 https://www.nature.com/articles/s41558-023-01784-4

Palmer, TN, A Döring and G Seregin (2014) The real butterfly effect. Nonlinearity 27(9) 10.1088/0951-7715/27/9/R123 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0951-7715/27/9/R123/meta

Pielke Jr., Roger (2018): Tracking progress on the economic costs of disasters under the indicators of the sustainable development goals, Environmental Hazards, DOI: 10.1080/17477891.2018.1540343

Pielke Jr., Roger (2020) Economic ‘normalisation’ of disaster losses 1998–2020: a literature review and assessment,” Environmental Hazards, 2020, pp. 1-19
Pielke Jr., Roger (2023) Global disaster losses: 1990-2023 Substack essay https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023
Resources for the Future (2025) “Social Cost of Carbon Explorer,” Resources for the Future website, accessed April 22, 2025, https://www.rff.org/publications/data-tools/scc-explorer/.
Roe, Gerard H. and Yoram Bauman (2013) Climate Sensitivity: Should the climate tail wag the policy dog? Climatic Change (2013) 117:647–662 DOI 10.1007/s10584-012-0582-6
Sandmo, Agnar (1975) “Optimal Taxation in the Presence of Externalities.” Swedish Journal of Economics 77 (1), 86–98.
Schelling, Thomas C (1992) Some economics of global warming. The American Economic Review, 82 (1):1–14.
Shen, Bo-Wen, Roger A Pielke Sr and Xubin Zeng (2023) The 50th Anniversary of the Metaphorical Butterfly Effect since Lorenz (1972): Multistability, Multiscale Predictability, and Sensitivity in Numerical Models. Atmosphere 2023 14(8) https://doi.org/10.3390/atmos14081279
Storm, S (2017) “How the Invisible Hand is Supposed to Adjust the Natural Thermostat: A Guide for the Perplexed.” Science and Engineering Ethics vol 23: 1307—1331.
Thoung, Chris (2017) “Is It Time to Kill Off the Social Cost of Carbon?” Cambridge Econometrics Blog, September 14, 2017, https://www.camecon.com/blog/time-kill-social-cost-carbon/.
Tol, Richard S.J. (1997) On the optimal control of carbon dioxide emissions: an application of FUND Environmental Modeling and Assessment 2: 151—163.
Tol, Richard S.J. (2017). "The Private Benefit of Carbon and its Social Cost," Working Paper Series 0717, Department of Economics, University of Sussex Business School. https://ideas.repec.org/p/sus/susewp/0717.html
Tol, Richard S.J. (2024) A meta-analysis of the total economic impact of climate change. Energy Policy 185 113922 https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113922
UK Department for Energy Security and Net Zero (2022). “Carbon Valuation.” GOV.UK, last updated April 4, 2022. https://www.gov.uk/government/collections/carbon-valuation--2.
US Environmental Protection Agency (2023) Supplementary Material for the Regulatory Impact Analysis for the Final Rulemaking, “Standards of Performance for New, Reconstructed, and Modified Sources and Emissions Guidelines for Existing Sources: Oil and Natural Gas Sector Climate Review”, EPA Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances, November 2023, https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf accessed February 28, 2024.
Yang, Yimin, Fei Jia, and Haoran Li. Estimation of panel data models with mixed sampling frequencies (2023). Oxford Bulletin of Economics and Statistics, 85(3):514–544.
Zhao, Xiaobing, Mason Gerety, and Nicolai V. Kuminoff (2018) Revisiting the temperature-economic growth relationship using global subnational data. Journal of environmental management, 223:537–544, 2018.

12 AZ USA KIBOCSÁTÁSI POLITIKÁINAK GLOBÁLIS ÉGHAJLATI HATÁSAI

Fejezet-összefoglaló

Az USA politikai intézkedéseinek várhatóan észrevehetetlenül kicsiny közvetlen hatása lesz a globális éghajlat alakulására, és minden egyes hatás csak nagyon hosszú idő elteltével jelentkezik.

12.1 A léptékprobléma

A kritikus légszennyező anyagok kibocsátási rátái és légköri koncentrációi szorosan összefüggenek, mivel élettartamuk rövid, koncentrációjuk pedig kicsi; tehát amikor a lokális kibocsátás csökken, a lokális szennyezőanyag-koncentráció gyorsan csökken, általában néhány napon belül. A globális átlagos CO_2-koncentráció azonban egészen másképp viselkedik, mivel a kibocsátások globálisan keverednek, továbbá a globális szénciklus hatalmas és lassú. A lokális CO_2-kibocsátás bármilyen változása ma csak nagyon kis globális hatással jár, és csak hosszú időkésleltetéssel.

A CO_2 légkörbe történő kibocsátását követően a többlet CO_2-nek csak körülbelül 40±15 százaléka kötődik meg húsz év alatt. Ez a hányad ezer év után 75±10 százalékra emelkedik, a fennmaradó rész pedig fokozatosan eltávolításra kerül az azt követő több tízezer év folyamán (Ciais et al., 2013, 472-473. o.). Következésképpen az amerikai kibocsátások bármilyen csökkentése csak mérsékelten lassítaná, de nem akadályozná meg a globális CO_2-koncentráció emelkedését. És még ha a globális kibocsátások holnap meg is állnának, évtizedekbe vagy évszázadokba telne, mire a globális CO_2-koncentráció, és így az éghajlatra gyakorolt emberi hatások érdemi csökkenését tapasztalnánk.

A légköri CO_2-készlet csökkentése megkövetelné, hogy a kibocsátás a természetes megkötési ráta alá csökkenjen, feltételezve, hogy a teljes növekedés antropogén. Mivel ez a ráta az elmúlt évtizedekben a kibocsátás átlagosan körülbelül 50 százalékát tette ki, a globális kibocsátás 50 százalékos csökkentése (legalábbis ideiglenesen) megállítaná a légköri CO_2 növekedését. Az 1997-es Kiotói Jegyzőkönyv azt javasolta, hogy az ipari országok CO_2-kibocsátását 2012-re az 1990-es szinthez képest szerény, öt százalékos csökkentési szinten korlátozzák. Bár ezt a politikát a legtöbb ország számára túl nehéz volt megvalósítani, a teljes betartás a légköri CO_2-szintet nem csökkentette volna jelentősen. Csak kismértékben lassította volna a CO_2 növekedését, úgy, hogy a 2100-as évre előre jelzett szintet 2105-re érnénk el (Wigley, 1998). Lomborg (2016) becslése szerint a Párizsi Megállapodásban vállalt kezdeti kötelezettségek teljes betartása nem állítaná meg a felmelegedést, csupán körülbelül 0,1 Celsius-fokkal akadályozná meg a felmelegedést, és körülbelül egy évtizeddel késleltetné a 2100-as alaphőmérsékleti szint elérését.

Így a hagyományos légszennyezés-szabályozással ellentétben még a drasztikus helyi intézkedéseknek is elhanyagolható helyi hatásaik lesznek, és az is csak hosszú időkéséssel. Az a gyakorlat, hogy az egyoldalú amerikai csökkentéseket „éghajlatváltozás elleni küzdelemnek” vagy „éghajlatváltozás elleni fellépésnek” nevezik, és azt feltételezik, hogy képesek vagyunk megállítani az éghajlatváltozást, a probléma mértékének mély félreértését tükrözi.

12.2 Esettanulmány: Az USA-gépjárművek kibocsátása

A léptékprobléma az amerikai gépjárművek példáján keresztül jól illusztrálható. Az EPA 2009-es veszélyeztetettségi megállapítása az Egyesült Államokban a személygépkocsik és a könnyű tehergépkocsik CO_2-kibocsátására összpontosított, mivel a Tiszta Levegő Törvény 202(a) szakasza felhatalmazza az EPA-t, hogy kibocsátási szabványokat határozzon meg a gépjárművek számára, ha a szennyező anyagokról kiderül, hogy veszélyeztetik a közegészséget vagy a jólétet. A 2009-es veszélyeztetettségi megállapítás ezért kötelezte az EPA-t az új gépjárművek kibocsátásának szabályozására, látszólag az amerikai lakosságot érő éghajlatváltozással kapcsolatos károk csökkentése vagy kiküszöbölése érdekében.

Két természetesen felmerülő kérdés: (1) Mekkora CO_2-kibocsátáscsökkenést eredményezne egy ilyen szabályozás? és (2) Milyen lenne egy ilyen szabályozás éghajlati hatása?

Az első kérdésre úgy lehet válaszolni, hogy az amerikai járművek CO_2-kibocsátását összehasonlítjuk a globális összkibocsátással. A második kérdésre az a tény válaszolható, hogy a globális felmelegedés csökkenése az EPA által használt modellek szerint arányos lenne a globális kibocsátások csökkenésével, szem előtt tartva, hogy a légkör CO_2-tartalmának változása egy adott évben a teljes globális CO_2-kibocsátás eredménye, nem csak az amerikai kibocsátásé.

2022-ben az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik kibocsátása összesen 1,05 milliárd tonna szén-dioxidot tett ki (GtCO2, EPA 2024). Eközben az energiafelhasználásból származó globális CO_2-kibocsátás összesen 34,6 $GtCO_2$ volt (Energy Institute 2024). Ezért az amerikai személygépkocsik és könnyű tehergépkocsik a globális energiával kapcsolatos CO_2-kibocsátásnak mindössze 3,0 százalékát teszik ki. Első közelítésben azt mondhatjuk, hogy még az összes amerikai járműalapú kibocsátás megszüntetése is egy-két évvel késleltetné a CO_2 felhalmozódását a légkörben egy évszázad alatt.

Ami az általános felmelegedési trendet is legfeljebb körülbelül 3 százalékkal csökkentené. Az 1979–2023 közötti időszakra, amely a legkiterjedtebb globális lefedettséggel rendelkezik az időjárási adattípusok közül, a felmelegedési trendeket körülbelül ±15 százalékos pontossággal határozzák meg, így az amerikai járművek CO_2-kibocsátásának megszüntetésével a globális felmelegedés ütemének csökkentésének hatása messze a mérhetőség határai alatt lenne. Tekintettel arra, hogy a globális átlaghőmérséklet a legközvetlenebb klímaváltozási mérőszám, az amerikai járművek CO_2-kibocsátásának csökkentéséből eredő, a másodlagos klímamutatókra (pl. súlyos időjárás, árvizek, aszály stb.) gyakorolt hatások még kevésbé lennének mérhetők.

Következésképpen, a helyi légszennyező anyagokkal (például apró részecskék és ózon) szemben hozott intézkedésekkel ellentétben, az amerikai járművek ÜHG-kibocsátására vonatkozó legagresszívabb szabályozási intézkedésektől sem várhatók el, hogy mérhető mértékben orvosolják az amerikai lakosságra leselkedő állítólagos klímaveszélyeket.

12.3 Zárógondolatok

E jelentés a klímapolitika tájékoztatása céljából árnyalt és bizonyítékokon alapuló megközelítést részesít előnyben, amely megközelítés kimondottan elismeri a bizonytalanságokat. A természetes és emberi hatások hatására bekövetkező éghajlatváltozás kockázatait és előnyeit össze kell mérni az „éghajlati intézkedések” költségeivel, hatékonyságával és járulékos hatásaival, figyelembe véve az ország megbízható és megfizethető energiára való igényét, a lehető legkisebb helyi szennyezés mellett. A globális éghajlati rendszer folyamatos, pontos, megszakítás nélküli megfigyelésén túl nagyon fontos, hogy reális feltételezéseket tegyünk a jövőbeli kibocsátásokkal kapcsolatban, az elfogultságok és bizonytalanságok kezelése érdekében újraértékeljük az éghajlati modelleket, és egyértelműen ismerjük el a szélsőséges események attribúciójával (oktulajdonításával) foglalkozó tanulmányok korlátait. A megalapozott és hatékony döntéshozatalhoz elengedhetetlen egy olyan megközelítés, amely a hibás modellekre és szélsőséges forgatókönyvekre való támaszkodás helyett elismeri a CO_2 potenciális kockázatait és előnyeit is.

Hivatkozások

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin,et al. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor,et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

EPA (2024) Fast Facts: U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990-2022. Available online at https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P101AKR0.pdf

Energy Institute (2024) Statistical Review of World Energy. Available online at https://www.energyinst.org/statistical-review

Lomborg, Bjorn (2016) “Impact of Current Climate Proposals” Global Policy 7(1) 109—118. Available at http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1758-5899.12295/full.

Wigley, T.M.L. (1998). “The Kyoto Protocol: CO_2, CH_4 and climate implications.” Geophysical Research Letters 25(13), 2285-2288

SZÓJEGYZÉK

$2XCO_2$: A légköri szén-dioxid (CO_2) megduplázódása, az éghajlatváltozás kezelésének általánosan használt alapértéke. 2025-ben a légköri CO_2-koncentráció körülbelül 50 százalékkal csökkent a $2XCO_2$-hoz képest az 1800-as értékhez képest.

ACE (összegzett ciklonenergia): A trópusi ciklon élettartama alatt felhalmozódott energia statisztikai jellemzője; a maximális tartós szélsebesség-négyzetek összegzéséből számítják ki.

ACRIM (Aktív Üregradiométer Besugárzás Monitor) GAP: A teljes napsugárzási adatsorban az 1989 és 1991 közötti adathiány, amit az előző rendszerrel való átfedés és interkalibráció érdekében szükséges műholdas megfigyelő rendszer elindításának késése okozott.

AEROSZOL: A levegőben lebegő apró szilárd vagy folyékony részecskék sokasága.

AMO: Atlanti Többévtizedes Oszcilláció, a tengerfelszín-hőmérséklet 60 éves ciklusa az Atlanti-óceán északi részén.

ANTROPOGÉN: Emberek általi.

AR (Értékelő Jelentés): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület által közzétett időszakos értékelés, amelyek az éghajlati rendszerről, a globális változásról és a kapcsolódó kérdésekről szóló jelenlegi ismereteket értékelik. Egy AR ma három munkacsoport jelentésből áll: az első (WG1) a fizikai tudománnyal, a másik kettő pedig a társadalmi hatásokkal és az enyhítési stratégiákkal foglalkozik. A legutóbbi AR az AR6 volt.

ATTRIBÚCIÓ: Oktulajdonítás: ok-okozati összefüggés állítása, mindenekelőtt az antropogén ÜHG-kibocsátás és a megfigyelt éghajlati mintázatok között.

AUTOKORRELÁCIÓ: Az a jelenség, amelyben egy véletlenszerű idősoros változó aktuális értéke korrelál egy korábbi időszakban mért értékkel.

BIOMASSZA: A szerves anyag teljes mennyisége vagy tömege egy adott területen vagy térfogatban.

BRUTTÓ ELSŐDLEGES TERMELÉS: A növények által a fotoszintézis folyamán egy meghatározott időszak alatt felhasznált teljes kémiai energia. A nettó elsődleges termelés a légzéshez szükséges energia felhasználása utáni maradék, és ez jelenti a biomassza növekedéséhez való hozzájárulást.

CMIP (Kapcsolt Modell Összehasonlító Projekt): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület szervezett erőfeszítése számos különféle globális óceán-légkör éghajlati modell olyan módon való összehasonlítására, hogy a kényszer mindegyikben ugyanazon kibocsátási forgatókönyv (forgatókönyvek) szerint alakul. A két legutóbbi a CMIP5 és a CMIP6 volt (az AR5, illetve az AR6 esetében).

CSÖKKENTÉS (abatement): A környezetpolitika kontextusában: kibocsátás-csökkentés.

DICE (Dinamikus Integrált Éghajlat- és Gazdaságmodell): A William Nordhaus által 1993-ban kidolgozott integrált értékelési modell.

DISZKONTRÁTA: A jövőbeni költségek és hasznok jelenértékre való átváltoztatására használt kamatláb. Fordított arányban változik a jelenértékkel, így a magas diszkontráta csökkenti a jövőbeni költségek és hasznok jelenértékét.

ECS (Egyensúlyi Klímaérzékenység): A légköri CO_2-koncentráció feltételezett megduplázódására adott válaszként a globális átlagos felszíni felmelegedésben bekövetkező hőmérsékletváltozás mértéke az iparosodás előtti szinthez képest.

ELHALÁLOZÁS: A halálesetek száma általában egy adott populációra és időszakra vonatkozóan kifejezve.

EL NIÑO: Az El Niño – Déli Oszcilláció meleg fázisa, amelynek idején a hideg víz a dél-amerikai partvidék mentén gyengébben áramlik fel, és gyengébbek a csendes-óceáni passzátszelek.

ENSO: El Niño – Déli Oszcilláció, egy kiemelkedő jelentőségű természetes éghajlati ingadozás, amely Dél-Amerika egyenlítői partján a hideg víz feláramlásának évenkénti változásait, valamint a Csendes-óceánon átívelő passzátszelek erősödését vagy gyengülését jelenti.

ÉGHAJLATVÁLTOZÁS: Az éghajlat emberi hatások miatti változása, szemben az éghajlat változékonyságával, ami természetes eredetű

FACE: (Szabad levegőjű CO_2-dúsulás) Nagyléptékű szabadtéri vizsgálatok, amelyekben a növényeket megemelkedett CO_2-szintnek teszik ki, jövőbeli éghajlati forgatókönyveket szimulálva.

FOSSZILIS TÜZELŐANYAG: Természetes eredetű, a geológiai múltban élő szervezetek

maradványaiból képződött széntartalmú tüzelőanyag, például szén, olaj vagy földgáz.

FOTOSZINTÉZIS: Az a folyamat, amelyben a növények növekednek, és amelyhez szén-dioxidra, vízre és fényre van szükség kellően meleg hőmérsékleten (10-35 Celsius fok az optimális működéshez).

FUND (Bizonytalanság, Tárgyalás és Eloszlás Keretrendszere): Richard Tol (1997) integrált értékelési modellje.

GBR (Nagy Korallzátony): A világ legnagyobb korallzátony-ökoszisztémája Ausztrália északkeleti partjainál.

GDP (Bruttó Hazai Termék): Egy ország határain belül, általában egy év alatt előállított összes végtermék és szolgáltatás piaci értéke.

GHCN (Globális Történeti Klimatológiai Hálózat): Időben változó számú, globális eloszlású meteorológiai állomások sokasága, ahol óránkénti, napi vagy havi csapadék-, hőmérséklet-, és esetenként havazás- és hóvastagság-mérést végeznek.

GLOBÁLIS ZÖLDÜLÉS: Az 1980-as évek eleje óta a legtöbb növényzettel borított szárazföldi területen műholdakkal megfigyelt zöldfelület-növekedés.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, beleértve az exportot és az importot is, általában egy évre vonatkoztatva.

GNP (Bruttó Nemzeti Termék): Egy ország polgárai által előállított összes belföldön előállított végtermék és szolgáltatás teljes piaci értéke, általában egy évre vonatkoztatva. [! (ford.]

HURST JELENSÉG: Lásd: hosszú távú perzisztencia.

HIDROLÓGIA: A víz mozgásának tanulmányozása, különösen a szárazföldön és a légkörben.

IAM (Integrált Értékelési Modell): Egy számítógépes eszköz, amely a közgazdaságtant, a klímatudományt és a társadalomtudományokat ötvözi, hogy kvantitatív kapcsolatokat teremtsen az emberi és a földi rendszerek között, segítve a politikai döntések megalapozását.

IEA (Nemzetközi Energiaügynökség): Egy 1974-ben alapított párizsi székhelyű kormányközi szervezet, amely a globális energiaszektorról nyújt politikai ajánlásokat, elemzéseket és adatokat.

IPAROSODÁS ELŐTTI: Az a rövid történelmi időszak, amikor még az emberi üvegházgáz-kibocsátás nem volt jelentősnek tekinthető- Általában az 1700-as évek közepére teszik.

IPCC (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület): Az Egyesült Nemzetek Szervezete és a Meteorológiai Világszervezet által 1988-ban létrehozott nemzetközi szakértőkből és kormányzati képviselőkből álló testület, amelynek célja, hogy a klímapolitika kidolgozásához felhasználható, mindenre kiterjedő tudományos információkkal lássa el a kormányokat.

IR (Infravörös): Hősugárzás, amelyet minden szilárd tárgy és üvegházhatású gáz hőmérsékletének megfelelően bocsát ki.

KIBOCSÁTÁSI FORGATÓKÖNYV: A jövőbeni üvegházgáz-kibocsátás (vagy az ebből eredő légköri koncentráció) feltételezett forgatókönyve, amely a globális gazdasági tevékenységre, a

fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának elterjedtségére és (esetenként) a szárazföld és az óceán CO_2-felvételének mértékére vonatkozó feltételezéseken alapul.

KÓNUSZ: Az Egyesült Államok területileg összefüggő 48 államának együttese.

KÖRNYEZETI (ambient): Ami valaminek a közvetlen környezetére vonatkozik.

KUKORICA: Tengeri.

LA NIÑA: Az ENSO hűvös fázisa, amelynek során a hideg víz erősebben áramlik fel a dél-amerikai partoknál, és erősebbek a csendes-óceáni passzátszelek.

LÚGOS: Aminek a kémiai pH-értéke nagyobb, mint 7,0. A savas „ellentéte", ami 7,0-nél kisebb pH-értéket jelent.

MODELL: Számítógépes kód vagy kódgyűjtemény, amely számszerűsíti a különböző folyamatokról és azok közötti kölcsönhatásokról alkotott ismereteinket.

NCA (Nemzeti Éghajlat-értékelés): Az 1990-es Globális Változáskutatási Törvény által előírt időszakos jelentés, amely összefoglalja az éghajlatváltozás Egyesült Államokra gyakorolt hatását. Öt NCA-jelentés készült: NCA1 (2000), NCA2 (2009), NCA3 (2014), NCA4 (2017-18) és NCA5 (2023).

OECD (Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet): 38 tagországból álló csoport, amelyek demokratikus kormányzati rendszerrel és szabad gazdasági rendszerrel rendelkeznek.

ÖKONOMETRIA: A közgazdaságtan azon ága, amely a gazdasági rendszerek elemzésével a statisztikai módszerek (főként többszörös regresszió) alkalmazásával foglalkozik.

PALEOKLÍMA: A távoli múlt éghajlata (jellemzően a 1850 előtti időszaké). A modern időjárási eszközök széles körben elterjedése előttről ún. proxi (proxy, „közvetett") méréseket, például fa-évgyűrűket, jégmagokat virágporokat stb. használnak.

PDI (Teljesítmény Disszipáció Index): A trópusi ciklon időbeli felhalmozódott pusztító potenciáljának statisztikai becslése. A maximális tartós szélsebességek köbének összegzéseként számítják ki.

PDO: Csendes-óceáni Évtizedes Oszcilláció, a Csendes-óceán medencéjének középponti részén ismétlődő óceán-légkör kölcsönhatás, amely túlnyomórészt meleg vagy hideg mintázatokkal jár, és befolyásolja a globális éghajlatot.

PPM: Egymilliomodnyi részecske, egy anyag koncentrációjának mértéke (például) a légkörben.

RCP (Reprezentatív Koncentráció Menet) SZCENARIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházhatású gázok kibocsátására és azok légkörre gyakorolt hatására vonatkozóan. Ezeket az IPCC ötödik értékelő jelentésében (AR5) mutatták be. Az RCP forgatókönyvek számcímkével (pl. RCP6.0) rendelkeznek, ami azt jelzi, hogy mennyi sugárzási kényszert feltételeznek 2100-ban az iparosodás előtti időkhöz képest, watt/négyzetméterben. Az RCP4.5 és az RCP6.0 köztes forgatókönyvek, míg az RCP8.5 egy szélsőséges forgatókönyv, nagyon nagy jövőbeli üvegházhatású gázkibocsátással.

REGRESSZIÓ: Statisztikai módszer egy lineáris egyenlet együtthatóinak kiválasztására, hogy egy függő változó viselkedését egy vagy több változótól való függés segítségével magyarázzák.

RICARDI ANALÍZIS: A környezetgazdaságtanban használt, David Ricardoról elnevezett módszer az éghajlatváltozás gazdasági hatásainak, különösen a mezőgazdaságra gyakorolt hatás becslésére, azon hipotézis felhasználásával, hogy a jövőbeli mezőgazdasági tevékenységhez való megtérülés várható változásai a jelenlegi földértékekben tőkésülnek.

SAVASODÁS: Általánosan használt kifejezés az óceán pH-értékének lúgosabbról kevésbé lúgos értékekre való csökkenésére.

SCC (a szén társadalmi költsége): Annak a nettó gazdasági kárnak a becslése dollárban, jelenértéken mérve, amit egy tonna CO_2 légkörbe kibocsátási többlete okoz.

SSP (Megosztott Társadalmi-gazdasági Menet) SZCENÁRIÓK: Különféle forgatókönyvek a jövőbeli üvegházgáz-kibocsátásra és azok légkörre gyakorolt hatására. Ezeket az IPCC hatodik értékelő

jelentésében (AR6) mutatták be. Néhány SSP forgatókönyv régebbi RCP forgatókönyveknek felel meg, a folytonosság és a korábbi klímamodell-értékelésekkel való összehasonlítás céljából.

SUGÁRZÁSI VISSZACSATOLÁS: A felszínhőmérséklet megváltozása által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SUGÁRZÁSI KÉNYSZER: Az üvegházhatású gázok, antropogén aeroszolok, vulkánkitörések stb. által okozott egyensúlyváltozás az elnyelt napsugárzás és a kibocsátott infravörös (IR) sugárzás között, a légkör tetején.

SZÁRAZJÉG: Fagyott szén-dioxid.

SZÉN („karbon"): A periódusos rendszer 6. eleme. Gyakran használják a szén-dioxid rövidítéseként.

TC: Trópusi ciklon.

TMAX: A napi maximális felszíni levegőhőmérséklet.

TMIN: A napi minimális felszíni levegőhőmérséklet.

TOA: A légkör teteje.

TONNA: tonna, azaz 1000 kg.

TOXIKOLÓGIA: Vegyi anyagok élő szervezetekre gyakorolt káros hatásainak vizsgálata.

TREND: Egy általában lineáris regresszióval becsült együttható, ami az adatok idősorához legjobban illeszkedő egyenes meredekségét jelenti, jelezve a sorozat átlagának időbeni felfelé vagy lefelé történő mozgásában bekövetkező tendenciát.

TSI (Teljes Napbesugárzás): A Föld légkörét elérő, egységnyi területre jutó teljes beeső napsugárzás mennyiségének mértéke, beleértve az elektromágneses sugárzás teljes hullámhossz-tartományára kiterjedően. Általában watt/négyzetméterben (W/m^2) adják meg.

ÜVEGHÁZHATÁS (GHE): Az a hajlam, hogy bármely, üvegházhatású gázt tartalmazó bolygó légköre a legalacsonyabb rétegekben melegebb, mintha ezen gázok a légkörben nem lennének jelen.

ÜVEGHÁZHATÁSÚ GÁZ (GHG, ÜHG, ÜVEGHÁZGÁZ): Olyan légköri gáz, amely az infravörös sugárzást elnyeli és kibocsátja, ilyen különösen a vízgőz, a CO_2 és a metán.

VESZÉLYEZTETETTSÉGI MEGÁLLAPÍTÁS (EF): A Környezetvédelmi Ügynökség igazgatójának 2009-es megállapítása, miszerint a jól elkevert üvegházhatású gázok (elsősorban a CO_2) kibocsátása veszélyezteti az emberi egészséget és jólétet.

UHI (Városi Hősziget): Az a jelleg, hogy a lakott területek melegebbek, mint vidéki környezetük, ami a természetes földterületek és növényzet utakkal, parkolókkal, épületekkel és hulladékhő-forrásokkal való felváltása miatt következik be.

USHCN: Az Egyesült Államok Történelmi Klimatológiai Hálózata, amely 1218 felszíni meteorológiai állomás minőségellenőrzött hőmérsékleti és csapadékadatait tartalmazza.

ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK METAADATAI

2.1. ábra: Képernyőkép Zhu et al. 2016 3. ábrájából https://www.nature.com/articles/nclimate3004

2.2. ábra: Képernyőkép Gerhart és Ward (2010) munkájából 2. ábra: https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1469-8137.2010.03441.x

2.3. ábra: Képernyőkép a Copernicus Marine Services-ből https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_OMI_HEALTH_carbon_ph_area_averaded/description

2.4. ábra: Képernyőkép az AIMS (2023) munkájából 2-4. ábra https://www.aims.gov.au/sites/default/files/2022-08/AIMS_LTMP_Report_on%20GBR_coral_status_2021_2022_040822F3.pdf

3.1.1. ábra: Az AR6 WG1 Ch2 képernyőképe, 10. ábra

3.1.2. ábra: Az AR6 WG1 Ch7 képernyőképe, 7-6. ábra

3.1.3. ábra: A szerző által készített ábra. CO_2 adatforrás: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html

3.2.1. ábra: Képernyőkép Hausfather et al. (2019) S4. ábra https://doi.org/10.1029/2019GL085378

3.2.2. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: Freidlingstein et al. (2024) https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2024-519 Adatforrás: https://globalcarbonbudget.org/download/1442/

3.2.3. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás: https://globalcarbonbudget.org/download/1442/

3.2.4. ábra: Szerző által létrehozott OLS trendek alapján, Adatforrás: https://globalcarbonbudget.org/download/1442/

4.1. ábra: Képernyőkép Scafetta (2021) 1. ábra: https://doi.org/10.3390/cli9110161

5.1. ábra: Adatforrás: https:climexp.knmi.nl/start.cgi Szerző által létrehozott ábra. Modellenként egy együttestag, az éves átlaghőmérséklet a globális havi nyers hőmérsékletekből lett kiszámítva; a „tartomány" az egyes évek legmelegebb modellhőmérséklete és a leghidegebb modellhőmérséklet különbsége; A szórás mind a 33 modell nyers hőmérsékletein kiszámítva minden évben.

5.2. ábra: Scafetta (2023) képernyőképe 2. ábra https://doi.org/10.1007/s00382-022-06493-w

5.3. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://climexp.knmi.nl/start.cgi. Modellenként egy SSP370 együttes tag. Lineáris OLS trendek a globális havi hőmérsékleti anomáliákból számítva 1981-2010-hez viszonyítva.

5.4. ábra: A szerző által készített ábra, McKitrick és Christy (2020) 3. ábrája alapján https://doi.org/10.1029/2020EA001281. Frissítve ugyanazokkal a módszerekkel és 2014-től 2024-ig kiterjesztett adatokkal, lásd McKitrick és Christy (2025) a fejezethivatkozásokban.

5.5. ábra: Az IPCC AR5 képernyőképe. 10.SM1 ábra, szerzői megjegyzésekkel

5.6. ábra: A szerző Christy és McNider (2017) https://doi.org/10.1007/s13143-017-0070-z nyomán készítette az ábrát, a frissített adatok a https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/ERA5_REANALYSES/ és

https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/JRA3Q_REANALYSES/ oldalon érhetők el, itt összeállítva: https://www.nsstc.uah.edu/data/cmip6/CWG25_Fig_5.7_Table_250627.xlsx

5.7. ábra: Képernyőkép a https://climate.rutgers.edu/snowcover/chart_seasonal.php?ui_set=nhland&ui_season=1 oldalról (hozzáférés: 2017. május 27.) 2025)

5.8. ábra: Rugenstein és Hakuba (2023) képernyőképe 1. ábra https://doi.org/10.1029/2022GL101802

5.9. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://climexp.knmi.nl/start.cgi. OLS lineáris trendek. Modellenként egy SSP370 együttes tag, átlagolt felszíni levegőhőmérsékletek júniustól augusztusig a 31N és 49N szélességi fok, 84W és 102W hosszúsági fok között. A NOAA/NCEI ugyanezen hónapokra vonatkozó megfigyelt hőmérsékleti adatai a https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/statewide/time-series oldalon a 12 kukoricaövi államra vonatkozóan, átlagolva.

6.1.1. ábra Koutsoyiannis (2013) 10. ábrájának szerzői másolata http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.804626

6.2.1. ábra Maue (2025) ábrájának képernyőképe https://climatlas.com/tropical/

6.2.2. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a Nemzeti Hurrikánközpontból (2024) https://www.nhc.noaa.gov/climo/

6.2.3. ábra A szerző által létrehozott ábra. Adatok a NOAA Hurrikánközpontból https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/All_U.S._Hurricanes.html

6.2.1. táblázat A szerző által létrehozott táblázat. NOAA HRD adatok https://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/most_intense.html

6.3.1. ábra: Képernyőkép az NCA4-ből

6.3.2. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.3. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.4. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.5. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.6. ábra: A szerző által létrehozott ábra. Adatforrás: https://www.nsstc.uah.edu/data/ushcn_jrc/

6.3.7. ábra Képernyőkép a https://www.globalchange.gov/indicators/heat-waves oldalról

Dobozos táblázatok. Szerző által létrehozott táblázat. McKitrick és Christy adatai (2025)

6.4.1. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKitrick és Christy adatai (2025)

6.4.2. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKitrick és Christy adatai (2025)

6.4.3. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKitrick és Christy adatai (2025)

6.4.4. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKitrick és Christy adatai (2025)

6.4.5. ábra Szerző által létrehozott ábra. McKitrick és Christy adatai (2025)

6.5.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://www.spc.noaa.gov/wcm/data/1950-2024_actual_tornadoes.csv

6.7.1. ábra: A szerző által készített ábra. Adatforrás: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/uspa/wet-dry/0, hozzáférés: 2025. június 16. OLS trendvonal hozzáadva.

6.8.1. ábra: Lizundia-Loiola et al. (2021) képernyőképe. 12. ábra.

6.8.2. ábra: Marlon et al. (2012) képernyőképe. 2. ábra, C panel. https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1112839109

6.8.3. ábra: A szerző által készített ábra. 1926-tól 2016-ig terjedő adatok: https://web.archive.org/web/20200212033452/https://www.nifc.gov/fireInfo/fireInfo_stats_totalFires.html. 2017 utáni adatok: https://www.nifc.gov/fire-information/statistics/wildfires Hozzáférés: 2025. június 16.

7.1. ábra: Képernyőkép a https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/ oldalról

7.1. táblázat: A szerző által létrehozott táblázat. A 6.2. szakaszból a https://judithcurry.com/wp-content/uploads/2018/11/special-report-sea-level-rise-3.pdf

7.2. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=9414290 (letöltve: 2025.04.22.)

7.3. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8771450 (letöltve: 2025.04.22.)

7.4. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8761724 (letöltve: 2025.04.22.)

7.5. ábra: Képernyőkép innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750 (letöltve: 2025.04.22.)

7.6. ábra: A szerző által készített ábra. Adatok innen: https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends_station.shtml?id=8518750

8.1. ábra Képernyőkép innen: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT5.0Analysis.pdf

8.2. ábra Képernyőkép Hansen és Karecha (2025) munkájából 1. ábra https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2025/CloudFeedback.13May2025.pdf

8.1. táblázat Képernyőkép a 12.12. táblázat 1. oszlopáról, IPCC AR6 Munkacsoport I. jelentése

9.1. ábra Képernyőkép Taylor és Schlenker (2021) munkájából 1. ábra, https://www.nber.org/papers/w29320

9.2. ábra Képernyőkép McKitrick (2025) munkájából 1. ábra, https://www.nature.com/articles/s41598-025-90254-2

10.1. ábra: Képernyőkép Pielke (2024) munkájából https://www.nature.com/articles/s44304-024-00011-0 3. ábra: 10.2. ábra: Képernyőkép Gasparini et al. munkájából (2015) 2. ábra, http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0

11.1. ábra: Képernyőkép Pielke Jr.-től (2023). https://rogerpielkejr.substack.com/p/global-disaster-losses1990-2023

11.2. ábra: Képernyőkép CEA-OMB-től (2023) https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/03/CEA-OMB-White-Paper.pdf 1. ábra.

A SZERZŐKRŐL

John Christy PhD a Huntsville-i Alabamai Egyetem Légkör- és Földtudományok Tanszékének kitüntetett professzora, valamint Alabama állam klimatológusa. Matematika szakon szerzett BA diplomát a Fresnó-i California State University-n, MSc-t és PhD-t a champaigni Illinois-i Egyetemen. Az Amerikai Meteorológiai Társaság tagja, és a NASA Kivételes Tudományos Teljesítményért járó Érem kitüntetésének birtokosa, ugyanis Dr. Roy Spencerrel együtt poláris pályán keringő műholdakról ők állították elő az első globális légköri hőmérsékleti adatsort. Ő volt a 3. IPCC Értékelő Jelentés (AR3, 2001) vezető szerzője: Társszerzője volt az amerikai NAS (Nemzeti Tudományos Akadémia) felszínhőmérséklet-rekonstrukciókról szóló szakértői jelentésének (2006), és tagja volt a NOAA Klímaváltozás Tudományos Programjának, a NASA Földtudományi Albizottságának, az amerikai Nemzeti Kutatási Tanács Űrkutatási Testületének és az USA Környezetvédelmi Hatóság (EPA) Tudományos Tanácsadó Testületének. Mindemellett Dr. Christy 20 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Judith Curry PhD a Georgia Institute of Technology nyugalmazott professzora, ahol 13 évig a Föld- és Légkörtudományi Tanszék vezetője volt. A Climate Forecast Applications Network (CFAN) elnöke és társalapítója. Geofizikából doktorált a Chicagói Egyetemen. 192 lektorált publikáció szerzője vagy társszerzője a légkör- és éghajlattudományok területén. Két tankönyv, valamint legutóbb a *Climate Uncertainty and Risk* című könyv szerzője. Curry tagja az Amerikai Meteorológiai Társaságnak, az Amerikai Tudományfejlesztési Társaságnak, az Amerikai Geofizikai Uniónak, valamint az Amerikai Tudományos és Irodalmi Akadémiának. Tagja volt a Globális Éghajlatkutatási Program számos tudományos irányító bizottságában, valamint az Energiaügyi Minisztérium Biológiai és Környezeti Kutatási Tanácsadó Bizottságában, a NASA Tanácsadó Testületének Földtudományi Albizottságában, valamint az NRC Űrkutatási Tanácsában és az Éghajlatkutatási Bizottságban. Dr. Curry 13 kongresszusi meghallgatáson tett tanúvallomást.

Honored (Nagytiszteletű) **Steven E. Koonin PhD** a Stanford Hoover Intézetében a „Teller Ede vezető munkatárs" cím birtokosa. Tudományügyi helyettes államtitkár volt az Energiaügyi Minisztériumban (2009-2011), vezető kutató a British Petrol-nál (2004-2009), valamint professzor a Caltech-en (1975-2004, ebből az elmúlt kilenc évben alelnök és igazgató). Koonin tagja a Nemzeti Tudományos Akadémiának és a JASON kormányzati tanácsadó csoportnak. A Lawrence Livermore Nemzeti Laboratórium kormányzója, hasonló tisztségeket töltött be a Los Alamos, a Sandia, a Brookhaven és az Argonne nemzeti laboratóriumokban. Korábban egyetemi professzorként dolgozott a New York-i Egyetemen, nem rezidens vezető munkatársként az American Enterprise Institute-ban, valamint a Védelmi Elemzések Intézetének kuratóriumi tagjaként. Koonin fizika szakon szerzett BSc diplomát a Caltech-en, elméleti fizikából pedig PhD fokozatot a Massachusetts Institute of Technology-n. Ő a 2021-es bestseller, az *Unsettled: What Climate Science Tells Us, What It Doesn't, and Why It Matters*, az 1985-ös *Computational Physics* című tankönyv, valamint a fizika, az asztrofizika, a tudományos számítás, az energiatechnológia és -politika, valamint a klímatudomány területén mintegy 200 lektorált cikk szerzője. [Az *Unsettled* 2023-ban *Tisztázatlan: Amit az éghajlattudomány mond, amit nem mond, és mindez miért fontos* címmel magyarul is megjelent.(ford.)]

Ross McKitrick PhD a kanadai Ontario állambeli Guelph Egyetem környezetgazdaságtan professzora. Közgazdaságtanból BA diplomát a Queen's Egyetemen, MA és PhD fokozatot pedig a British Columbia Egyetemen szerzett. Éghajlatváltozással, szennyezéssel és közpolitikával kapcsolatos témákban széleskörű publikációs tevékenységet fejtett ki mind közgazdaságtudományi, mind fizikai folyóiratokban. Könyvét, a *Economic Analysis of Environmental Policy*-t, a University of Toronto Press adta ki 2010-ben. Az alkalmazott statisztikában szerzett ismeretei arra késztették, hogy lektorált cikkek szerzője, illetve társszerzője legyen a fizikai tudományok széles skáláján, beleértve a

paleoéghajlat rekonstrukcióját, a malária terjedését, a felszínhőmérséklet mérését, az éghajlati attribúció (oktulajdonítás) módszertanát és az éghajlati modell értékelését. McKitrick professzor világszerte számos meghívásos tudományos előadást tartott. Meghívott közreműködő volt a Nemzeti Tudományos Akadémia 2006-os felszínhőmérséklet-rekonstrukcióról szóló jelentésében, szaklektorként szolgált a három legutóbbi IPCC értékelő jelentésben (I. és II. munkacsoport), és tanúvallomásokat tett az Egyesült Államok Kongresszusa, valamint a kanadai alsóház és szenátus bizottságai előtt.

Roy W. Spencer PhD vezető kutató az Alabamai Egyetemen, Huntsville-ben. Légkör- és Óceántudományi BSc diplomát a Michigani Egyetemen szerzett, MSc és PhD fokozatát meteorológiából a Wisconsin-Madison Egyetemen kapta. Spencer tudományos publikációi az időjárási folyamatok és az éghajlatváltozás Föld körül keringő műholdakról történő megfigyelésére, valamint az éghajlati érzékenység és az éghajlati visszacsatolások diagnosztizálására szolgáló egyszerű fizikai modellek használatára összpontosítottak. A NASA klímakutatásokért felelős vezető kutatójaként az Aqua műhold ún. Fejlett Mikrohullámú Pásztázó Radiométer (AMSR-E) amerikai tudományos csoport vezetőjeként szolgált. Ez a tengerfelszín-hőmérsékletről, a tengeri jégről és az éghajlati rendszer számos egyéb jellemzőjéről a lehető legpontosabb globális mérési eredményeket szolgáltatta. Dr. John Christyvel együtt Spencer fejlesztette ki az első műholdas technikát a globális hőmérséklet-megfigyelésre, amiért megkapták a NASA Kivételes Tudományos Teljesítmény Érmét és az Amerikai Meteorológiai Társaság különdíját.

A 2025. július 23-án angol nyelven megjelent DOE-jelentés magyar fordítása a Professzorok Batthyány Köre energia-munkacsoport keretében készült.

Fordítás: Szarka László Csaba, Kocsis Ferenc, Király József, Kiss Ádám, Szabó Csaba Attila, Bársony István

Bevezető: Szarka László Csaba

Észrevételek a laszloszarka54@gmailcom címre küldhetők.

2025. augusztus 26.