



Milyen hatása lenne az AMOC leállásának a hőmérsékleti viszonyokra hazánkban és Délnyugat-Norvégiában?

Nagy Alexander, Kis Anna

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, krisztialex@gmail.com

DOI:10.56474/legkor.2026.2.4

Az elmúlt néhány évben az AMOC leállásával és annak feltételezett következményeivel sokat foglalkozott a média. Rengeteg szenzációhajász cikk látott napvilágot, amik nem mutatták be a szimulációkban rejlő bizonytalanságot. Ennek a tanulmánynak a tájékoztatás a célja az elemzés korlátainak figyelembevételével. Egy klímamodell több szimulációja alapján, több forgatókönyv mellett mutatjuk be az AMOC esetleges leállásának hőmérsékletre gyakorolt hatásait két kiválasztott régióra, Magyarországra és Délnyugat-Norvégiára vonatkozóan.

What is the potential effect of an AMOC collapse on temperature conditions in Hungary and Southwestern Norway?

The collapse of the AMOC and its potential consequences was a hot topic in the media in the recent years. Several clickbait articles were published, which often hide the uncertainty related to the simulations. The aim of the present study is to present an analysis considering the limitations as well. The potential effect of the collapsed AMOC on temperature is shown for two regions (Hungary and Southwestern-Norway) based on climate model simulations, taking into account different scenarios.

Világunk változik. Ez megkérdőjelezhetetlen tény. Az éghajlatváltozás gyorsan fejlődő civilizációnk egy olyan kiemelt problémája, amelynek következményeit már most saját bőrünkön érezzük. Napi rendszerességgel olvashatunk az emelkedő tengerszintről, pusztító erdőtűzekről, súlyos aszályokról, tikkasztó hóhullámokról és hatalmas árvizekről. Ám ezek a folyamatok nem csak önmagukban okoznak problémát, hiszen az éghajlati rendszer egy komplex rendszer, amiben úgynevezett fordulópontokat (az angol nyelvű szakirodalomban használatos elnevezés: tipping points;

Lenton, 2021) definiálhatunk, amiket átlépve bizonyos folyamatok öngerjesztővé és visszafordíthatatlanná válhatnak. Így a tőlünk több ezer kilométerre lokálisnak vélt probléma máris egy globális, ránk is ható problémává válik.

Mik azok az éghajlati fordulópontok?

Vegyünk egy hétköznapi példát: készítsünk tükörtlátást! Ahhoz, hogy a nyers tojásból eljussunk a kész ételhez, különböző kulcsmozzanatokat kell megtennünk.

Először fel kell törnünk a tojást, aztán a tartalmát a serpenyőbe öntjük, végül készre sütjük. A lényeg, hogy a tojás már sosem lesz ugyanolyan, mint előtte volt. A tükörtőjást nem tudjuk újra nyerssé és egészsé varázsolni. Az éghajlati rendszerben a fordulópontok ugyanilyenek. Átlépve őket olyan folyamatok indulnak el az éghajlati rendszeren belül, melyek után már nem áll vissza a korábbi állapot. Vagyis egy sor kis változás, esemény elég súlyossá válhat ahhoz, hogy a rendszert az addigi egyensúlyi állapotából kibillentse, és egy új egyensúlyi állapotba kényszerítse (Lenton *et al.*, 2023).

A fordulópontok átlépésük során egymásra is hatással lehetnek. Például a gyorsuló grönlandi jégolvadás miatt egyre több édesvíz kerül az óceánba, és ez megtöri az Atlanti-óceán meridionális áramlási rendszerét, ami miatt nem érkezik az alacsonyabb szélességi körökről az eddig megszokott többlethő, így lehűléshez vezet (Lohmann and Ditlevsen, 2021). Az éghajlati rendszerünkben több fordulópontot határoztak meg, de kiemelendő, hogy az átlépésük hétköznapi értelemben nem pillanatszerű. Évtizedes, évszázados folyamatokról beszélünk (Armstrong McKay *et al.*, 2022).

Mi az az AMOC és miért fontos?

Az AMOC vagyis az Atlantic Meridional Overturning Circulation (magyarul: Atlanti-óceáni Meridionális Áramlási Rendszer) egy hatalmas, komplex áramlási rendszer az Atlanti-óceánban. Ahhoz, hogy felfoghassuk a méreteit, vegyük alapul a Duna budapesti szakaszának átlagos vízhozamát, és szorozzuk meg 40 000-rel. Persze vehetjük alapul bolygónk legbővizűbb folyóját, az Amazonast is, akkor is legalább 1000-rel kell szoroznunk, hogy megkapjuk az áramlat által mozgatott víz mennyiségét (Weidinger és Tasnádi, 2020). A működése leginkább egy futószalaghoz hasonlítható. A trópusokról a meleg tengervíz a felszín közelében észak felé áramlik, ahol az általa szállított hőt leadja. Ez a hőmennyiség akkora, ami a közepes szélességekre érkező hőtranszport 20-30%-át teszi ki (Jackson *et al.*, 2022).

A meleg tengervíz ahogy leadja a hőt, lehűl, de mivel sókoncentrációja nem változik, így alábukik, és a tengerfenék mentén dél felé fordul, ahol ismét felemelkedik, és ezzel a kör bezárul (Jackson *et al.*, 2022). Emiatt az áramlat érzékeny az édes-sós víz egyensúlyára (Bordi és Szépszó, 2024). Ha valamilyen okból, például a gyorsuló grönlandi jégolvadásból, a hegyi gleccserek oladásából és az óceán felett lehulló csapadék növekvő mennyiségéből több édesvíz kerül az óceánba, az felhígul, meggátolva az alábukást, és így az áramlat körfolyamata megszakad.

Bár történeti feljegyzéseink nincsenek az AMOC összeomlásáról és következményeiről, proxy adatokból, jégfurat minták és tavi üledékek vizsgálataiból tudhatjuk, hogy a múltban nem egyszer omlott már össze az áramlat. Ezek az események szinte mindig nagy mennyiségű édesvíz beáramlásával voltak kapcsolatban, és az interglaciálisok során következtek be. A legutóbbi ilyen esemény kb. 11 700-12 900 évvel ezelőtt fordult elő. Ezt az eseményt fiatalabb Dryas-eseménynek nevezzük. Ekkor az Észak-Amerika nagy részét borító jégtakaró jelentős hányada elolvadt, és az abból származó olvadékvíz az Észak-Atlanti-óceánba ömlött, ami az áramlat összeomlását okozta (Carlson, 2013).

Adatok és módszertan

Vajon milyen hatása lenne, ha mindez a mi életünkben következne be? Milyen hatással lenne az éghajlatra globálisan, Európában, és hazánkban? Ahhoz, hogy ezt megválaszolhassuk, a tudományos cikkek elolvasása mellett megvizsgáltuk a CESM (Community Earth System Model) klímamodell szimulációját. A CESM egy komplex Föld-rendszer modell, ami egyszerre tudja kezelni az atmoszféra, az óceán, a tengerjég, a szárazföld, a szén- és biokémiai ciklusokat. A felbontása 2° (vagyis kb. 200 km) az atmoszféra és szárazföldi komponensek esetében, illetve 1° az óceán és tengerjég esetében (van Westen and Baatsen, 2025a). Az AMOC-leállás hatásainak vizsgálatához az óceánba extra édesvizet adtak (van Westen *et al.*, 2024), amire azért volt szükség, mert a modell túl stabilnak mutatta az áramlatot. A modellel két forgatókönyvet, az RCP4.5-öt és az RCP8.5-öt vizsgálták – melyek rendre kb. 2 °C-os, illetve 4 °C-os globális átlaghőmérséklet-emelkedést jeleznek a 21. század végére – működő (AMOC ON) és nem működő (AMOC OFF) AMOC-ra a 2006–2100-as időszakra, majd a szimulációkat 2499-ig folytatták. Megjegyezzük, hogy az RCP8.5-ös forgatókönyv esetén csak az AMOC OFF szimuláció állt rendelkezésre. Több, hőmérséklettel kapcsolatos index kiszámítását végezték el (1. táblázat), amelyek időben átlagolt értékei szabadon hozzáférhetők, továbbá egy interaktív vizuális felületen [1] megtekinthetők. Ezen, a szimulációk eredményéből számított értékeket a Zenodo adatbázis-gyűjteményből nyertük ki a teljes Földre vonatkozóan (van Westen és Baatsen, 2025b). A jelen kutatás fókuszában az éves és szezonális átlaghőmérsékletek, valamint a különböző hőmérsékleti küszöbök átlépésével kapcsolatos napok (téli napok: $T_{\max} < 0\text{ °C}$, nyári napok: $T_{\max} > 25\text{ °C}$) átlagos évi számának alakulása álltak. A regionális

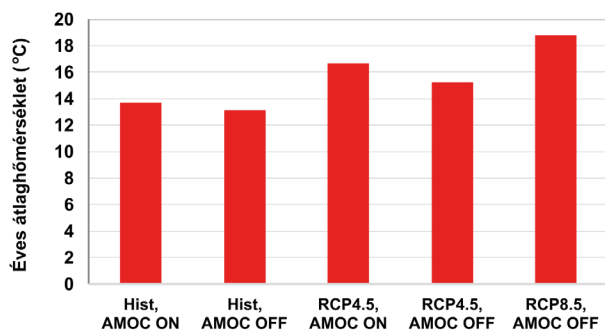
Éves átlaghőmérséklet	°C
Nyári átlaghőmérséklet (jún., júl., aug.)	°C
Téli átlaghőmérséklet (dec., jan., febr.)	°C
10 évente előforduló extrém minimumhőmérsékletek	°C
10 évente előforduló extrém maximumhőmérsékletek	°C
Márciusi (maximum) tengerjég kiterjedésének átlaga	-
Téli napok számának átlaga ($T_{\max} < 0$ °C)	nap
Fagyos napok számának átlaga ($T_{\min} < 0$ °C)	nap
Meleg napok számának átlaga ($T_{\max} > 20$ °C)	nap
Nyári napok számának átlaga ($T_{\max} > 25$ °C)	nap
Hőszénapok számának átlaga ($T_{\max} > 30$ °C)	nap
Trópusi éjszakák számának átlaga ($T_{\min} > 20$ °C)	nap

1. táblázat. A CESM modellszimuláció alapján elérhető mutatók és mértékegységeik.

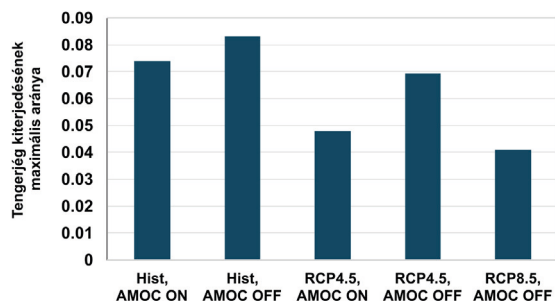
elemzéshez egy-egy Magyarországot és Délnyugat-Norvégiát reprezentáló területet (rendre 45,75°–48,5°É; 16°–23°K és 58°–62°É; 4°–10°K) jelöltünk ki.

Eredmények

Az AMOC leállása az egész éghajlati rendszerben jelentős változásokat okozna. Globális szinten mérsekelné a felmelegedés mértékét: az RCP4.5 esetén a globális átlaghőmérséklet 15,3 °C lenne, ami bár 1,4 °C-kal alacsonyabb a működő AMOC-os szcenárióhoz képest, még mindig közel 1,6 °C-kal lenne melegebb a historikus átlagnál. Ez a mérséklő hatás az RCP8.5 forgatókönyv esetén kevésbé domináns, a melegedés továbbra is jelentős maradna (1. ábra).



1. ábra. A globális éves átlaghőmérséklet a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.



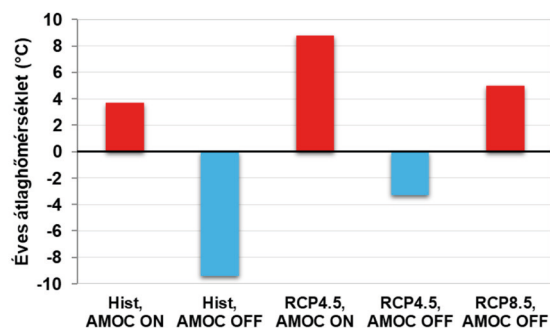
2. ábra. A tengerjég kiterjedésének maximális arányai a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján (1 jelenti a teljes, azaz 100%-os jégborítottságot).

Az Észak-Atlanti térségben az összeomlás drasztikus változást idézne elő: az RCP4.5 (AMOC OFF) szcenárió szerint a hőmérséklet nagymértékű csökkenése mellett a tengerjég márciusi kiterjedése jelentősen megnőne a működő AMOC figyelembevételével készített szimulációs eredményekhez képest. Bár némileg még mindig elmaradna az iparosodás előtti szinttől (2. ábra), de akár lehetségessé válna a száraz lábbal való átkelés Kanada és Norvégia között.

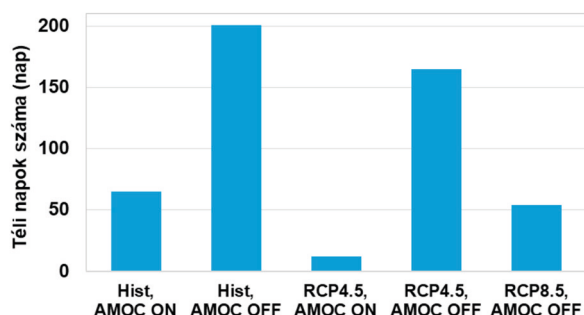
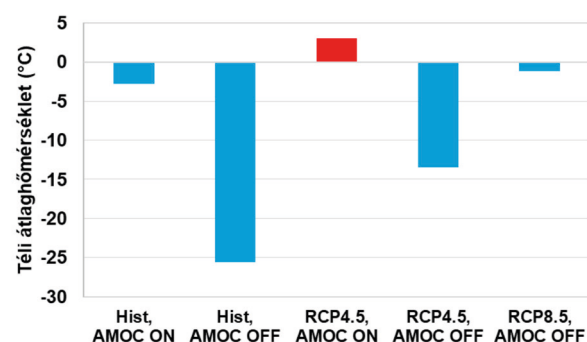
A regionális hatások tekintetében jelentős különbségek mutatkoznak a két vizsgált terület, azaz Magyarország és Délnyugat-Norvégia között.

Délnyugat-Norvégia

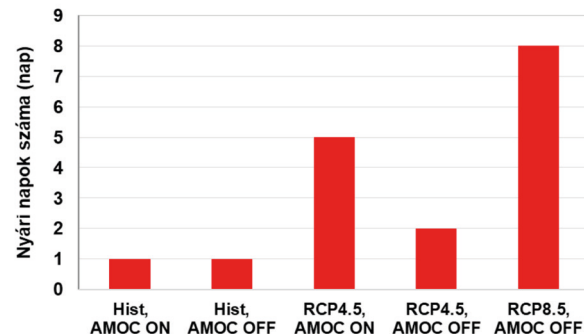
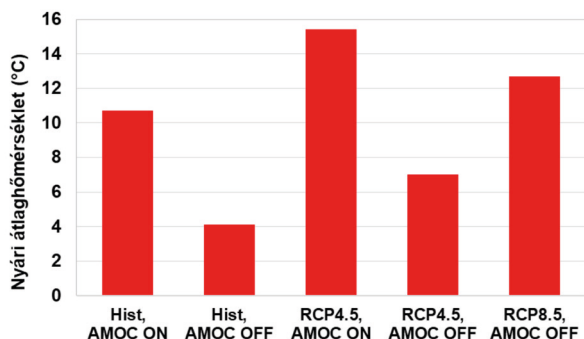
Mivel a térség éghajlatára közvetlen hatással van az áramlat, emiatt extrém nagymértékű lehűlés következne be az AMOC összeomlása esetén. Az RCP4.5 forgatókönyv szerint az éves átlaghőmérséklet -3,3 °C környékén mozogna, ami 7 °C-kal marad el az iparosodás előtti (hist) értéktől (3. ábra), a téli átlaghőmérséklet pedig még extrém módon 16,5 °C-kal lenne alacsonyabb a működő AMOC-hoz képest, és



3. ábra. Az éves átlaghőmérséklet Norvégia délnyugati részén a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.

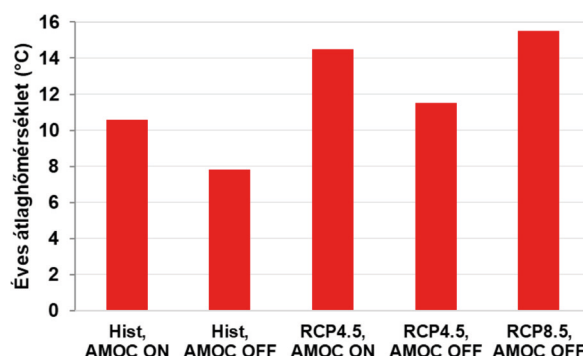


4. ábra. A téli átlaghőmérséklet és a téli napok átlagos évi száma Norvégia délnyugati részén a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.



5. ábra. A nyári átlaghőmérséklet és a nyári napok átlagos évi száma Norvégia délnyugati részén a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.

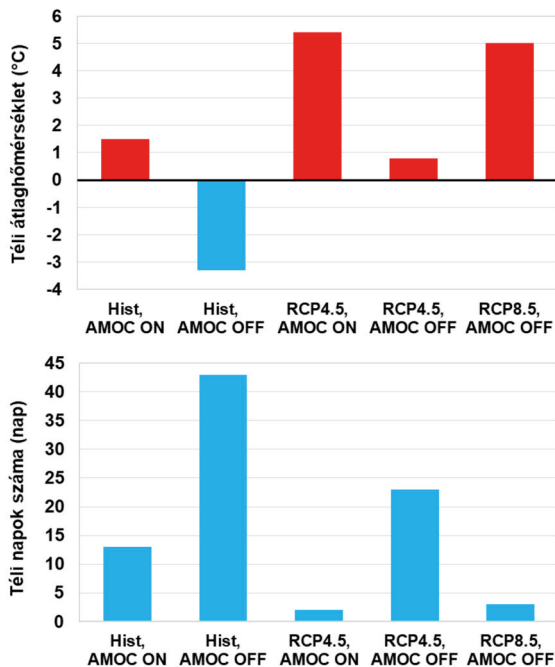
közel 10 °C-kal térne el a múltbeli átlagtól. A téli napok száma a múltbeli AMOC ON referencia értékhöz képest csökkenne az áramlat fennmaradása esetén, míg az összeomlással számolva több mint duplájára emelkedne (4. ábra). Az RCP8.5 (AMOC OFF) esetén kisebb mértékű változásokra lehetne számítani, mivel az áramlat leállásához köthető hőmérsékletcsökkenést ellensúlyozná a globális felmelegedés. Az áramlat összeomlása esetén a nyár átlaghőmérséklete 3,8 °C-kal maradna el az iparosodás előtti, AMOC ON referencia értéktől és 8,4 °C-kal a működő AMOC figyelembevételével, az RCP4.5 forgatókönyv szerint kapott szimulált értéktől, ám a nyári napok számában csak az RCP8.5 esetén jelenik meg jelentősebb változás (5. ábra).



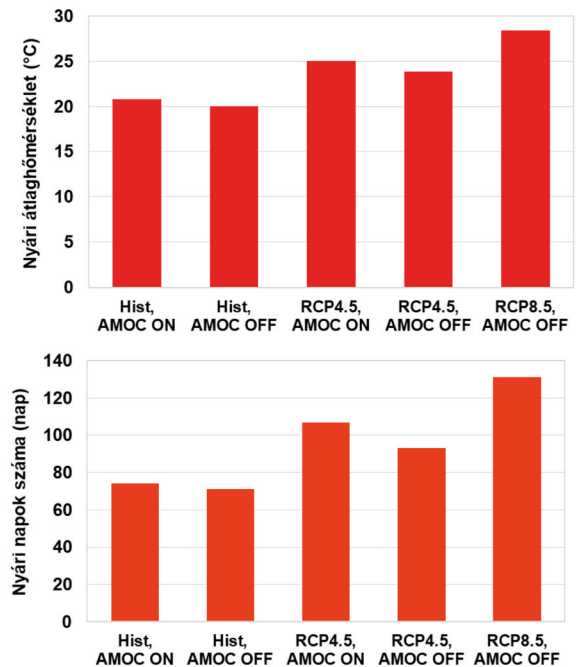
6. ábra. Az éves átlaghőmérséklet Magyarországon a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.

Magyarország

Bár hazánk távolabb fekszik az Atlanti-óceántól, ne legyen hamis biztonságérzetünk. Az AMOC leállása itt is érezhető lehűlést okozna, igaz a klímaváltozásból eredő felmelegedés hatása itt mindkét szcenárió (RCP4.5 és RCP8.5) esetén általánosságban erősebbnek adódott. Az RCP4.5 (AMOC OFF) forgatókönyv mellett az éves átlaghőmérséklet 11,5 °C lenne, ami 3 °C-kal alacsonyabb, mint a működő áramlat esetén (6. ábra). Délnyugat-Norvégiával ellentétben a hatások szezonálisan aszimmetrikusak lennének a szimuláció szerint: a lehűlés a téli félévben erőteljesebben mutatkozna meg (7-8. ábra). Az RCP4.5 forgatókönyv alapján míg a nyári átlaghőmérséklet csupán 1,2 °C-kal csökkenne a nem működő AMOC esetén (bár még így is 3 °C-kal melegebb lenne az iparosodás előtti értékénél, 8. ábra), addig a telek jelentősen, akár 5 °C-kal lennének hidegebbek. Ez utóbbi a téli napok átlagos számának jelentős emelkedésében is megmutatkozik (7. ábra): a múltbeli időszakban 30 napos különbség



7. ábra. A téli átlaghőmérséklet és a téli napok átlagos évi száma Magyarországon a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.



8. ábra. A nyári átlaghőmérséklet és a nyári napok átlagos évi száma Magyarországon a különböző forgatókönyvek esetén, a CESM modell szimulációja alapján.

adódik a működő és nem-működő AMOC-kal végzett szimulációk között. A becslések szerint csak az RCP4.5 (AMOC OFF) Szenárió esetén haladná meg a téli napok száma a 20 napot hazánkban, míg a másik két esetben 5 nap alatt maradna. Ahogyan a korábbiakban is említettük, a nyári napok számára kisebb hatást gyakorol az AMOC: a múltbeli időszakban elenyésző (3 nap) a két eset közti különbség, azonban mindkét RCP forgatókönyv esetén (még az RCP4.5, AMOC OFF is) emelkedést mutat (8. ábra).

Konklúzió

Kell aggódnunk az AMOC leállása miatt? A válasz egyszerű: igen. Láthattuk, mennyire fontos az áramlat működése a globális éghajlat alakításában. Azt is láthattuk, hogy mekkora változásokat okozna hazánk és Délnyugat-Norvégia éghajlatában, de fontos megjegyezni, hogy a bemutatott eredmények bizonytalansággal terheltek, hiszen csak egy klímamodell-szimulációja alapján készültek. A globális felmelegedés miatti fokozódó grönlandi jégolvadás következtében az áramlat már most gyengül: egyes becslések szerint az é.sz. 25°-nál 30%-kal lassult 1957 és 2004 között (Bryden *et al.*, 2005), és a szállítószalag déli irányú transzportja is csökkent 1000 méter alatt. Ezek mind

az áramlat lassulásának határozott jelei. Bár mi csak két kisebb régiót és néhány éghajlati mutatót vizsgáltunk meg, azokban szemmel láthatóan nem elhanyagolható változások voltak megfigyelhetők.

Nem tudjuk, hogy az áramlat összeomlása milyen hatással lenne a többi éghajlati fordulóponton, ahogyan jelenleg azt sem tudjuk megmondani, hogy ez pontosan mikor következhet be. Egyes tanulmányok szerint 2100 előtt alacsony az összeomlás bekövetkezésének valószínűsége, de nagyon valószínű, hogy gyengülni fog az áramlat a század során (Lee *et al.*, 2021), más eredmények szerint pedig akár 2050-ben is bekövetkezhet a leállás (Ditlevsen and Ditlevsen, 2023). Az egyik fő probléma az adatok és a megfigyelések hiánya, hiszen magát az áramlatot csak a 2000-es évek eleje óta kutatjuk, és mérjük az erősségét. Minden ezt megelőző adat csak következtetések alapján áll rendelkezésre, amik nagyobb bizonytalansággal lehetnek terhelve. Emiatt sem tudjuk meghatározni az áramlat kritikus küszöb- és billenési pont értékeit, és azt, hogy azokhoz jelenleg mennyire van közeli állapotban. A helyzetet az is bonyolítja, hogy az AMOC akár többszörös egyensúlyi helyzetben is lehet (Weijer *et al.*, 2019). Az viszont biztos, hogy az idő ellenünk dolgozik. Lehetséges, hogy az áramlat csak 2100 után omlik össze, de a tétlenségünkért akkor is az unokáink, dédunokáink, üku-

nokáink fizetik majd meg az árat. Ezért fontos az, hogy az éghajlatváltozás mérséklésére irányuló törekvések mellett már most elkezdjünk alkalmazkodni a bekövetkezett és a várható változásokhoz.

Irodalomjegyzék

- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., ... and Lenton, T. M., 2022: Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377, eabn7950. <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>
- Bordi, S. és Szépszó, G., 2024: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra. *Légkör* 69, 37–42. <https://doi.org/10.56474/legkor.2024.K.6>
- Bryden, H.L., Longworth and H.R., Cunningham, S.A., 2005: Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature* 438, 655–657. <https://doi.org/10.1038/nature04385>
- Ditlevsen, P. and Ditlevsen, S., 2023: Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nat. Commun.* 14, 4254. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>
- Jackson, L. C., Biastoch, A., Buckley, M. W., Desbruyeres, D. G., Frajka-Williams, E., Moat, B., Robson and J., 2022: The evolution of the North Atlantic Meridional Overturning Circulation since 1980. *Nat. Rev. Earth Environ* 3, 241–254. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00263-2>
- Lee, J. Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., ... and Zhou, T., 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. 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 (szerk.: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 553–672. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- Lenton, T. M., 2021: Tipping points in the climate system. *Weather* 76(10), 325–326. <https://doi.org/10.1002/wea.4058>
- Lenton, T. M., Armstrong McKay, D. I., Loriani, S., Abrams, J. F., Lade, S. J., Donges, J. F., ... and Dyke, J. G., 2023: The Global Tipping Points Report 2023. University of Exeter, Exeter, UK. 478.
- Lohmann, J. and Ditlevsen, P.D., 2021: Risk of tipping the overturning circulation due to increasing rates of ice melt. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences* 118(9), e2017989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017989118>
- Weidinger, T. és Tasnádi, P., 2020: Víz a légkörben. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek* 32, 81–104. <https://doi.org/10.31852/EMF.32.2020.081-104>
- van Westen, R. M., Kliphuis, M. and Dijkstra, H. A., 2024: Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science Advances* 10(6), eadk1189. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>
- van Westen, R. M. and Baatsen, M. L. J., 2025a: European Temperature Extremes Under Different AMOC Scenarios in the Community Earth System Model. *Geophysical Research Letters* 52(12), e2025GL114611. <https://doi.org/10.1029/2025GL114611>
- van Westen, R. and Baatsen, M., 2025b: Data for the AMOC Collapse Visualisation [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15490235>
- Weijer, W., Cheng, W., Drijfhout, S. S., Fedorov, A. V., Hu, A., Jackson, L. C., ... and Zhang, J., 2019: Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A Review and Synthesis. *JGR Oceans* 124(8), 5336–5375. <https://doi.org/10.1029/2019JC015083>
- A.E. Carlson 2013: PALEOCLIMATE | The Younger Dryas Climate Event. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53643-3.00029-7>

Internetes hivatkozások

- [1] <https://amocscenarios.org/>