



JAKOVÁC ANTAL

fizikus, egyetemi tanár, az MTA doktora, Wigner RCP, Komputációs Tudományok Osztálya

jakovac.antal@wigner.hu

KIVONAT A klímaváltozással kapcsolatban sok információt lehet hallani, számtalan forrásból értesülhetünk arról a vészhelyzetről, amelyben földünk van. A helyes cselekvéshez azonban pontosan érteni kell a háttérjelenségeket, hogy erőforrásainkat a megfelelő módon használhassuk fel. Ebben a cikkben áttekintünk pár jelenségek körét, és mélyebben megvizsgáljuk a hátterüket. Megnézzük, vajon mennyire tekinthető anomálishan magasnak a jelenlegi átlaghőmérséklet, hogy milyen szerepe van a szén-dioxidnak az üvegházhatásban, és mit jelentene a koncentráció további emelkedése. Áttekintjük, hogyan hatnak a klímára a nagy vízi és légköri áramlások, és milyen globális trendek húzódnak az elsivatagosodás mögött. A részletesebb elemzés megmutatja, hogy a klímavédelemben nem feltétlenül a CO₂-szint emelkedése elleni küzdelem a leghatásosabb eszköz, a negatív jelenségek leküzdésében a modern mezőgazdasági és vízgazdálkodási elvek érvényesítésének valójában jóval nagyobb szerepe van.

KULCSSZAVAK klímaváltozás, felmelegedés, üvegházhatás, szén-dioxid-szint, elsivatagosodás

VÍZ ÉS TUDOMÁNY

Klímaváltozás kritikus szemmel

1. BEVEZETÉS

Habár a mai közbeszédet leginkább a Covid-járvány uralja, környezetünk és így az egész emberiség hosszú távú túlélése szempontjából a földi fenntartható fejlődés sokkal fajsúlyosabb kérdés. David Attenborough „A life on our planet” (Egy élet a bolygónkon) című 2020-as filmje drámai összehasonlítást ad Földünk XX. század közepi és XXI. század eleji állapotáról: környezetünk pusztulása, fajok kihalása, elsivatagosodás kíséri az emberiség fejlődését. Ezen folyamatok katasztrófához vezethetnek, ha nem lépünk időben és a megfelelő irányban.

Van egy láthatólag széles körben elterjedt narratíva, amely szerint a fenti negatív jelenségek előidézője a globális felmelegedés, általánosabban a klímaváltozás, ezt pedig az emberi tevékenység során a légkörbe került CO₂ üvegházhatása okozza. A klímaváltozás következménye az extrém időjárási jelenségek sűrűsödése, a gleccserek visszahúzódása, az elsivatagosodás, a sarki jég olvadása, a tenger szintjének emelkedése és még számtalan negatív jelenség.

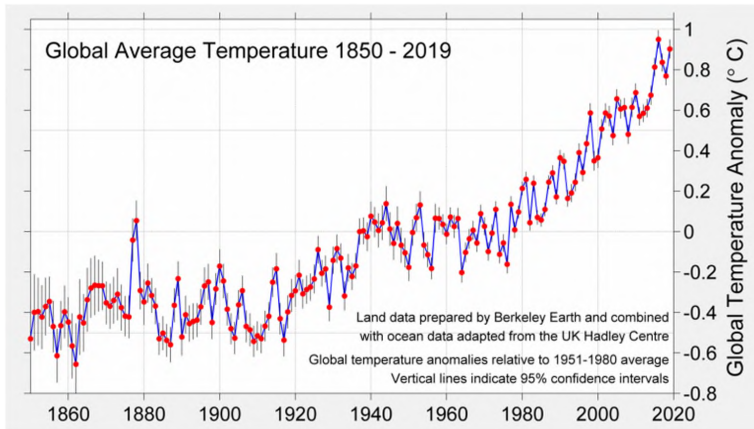
Ha ez a megfelelő értelmezés, akkor a Föld jövője szempontjából a CO₂-kibocsátást kell korlátozni, és reménykedni, hogy a Föld újraregenerálódik. Azonban a földi klíma rendkívül bonyolult rendszert alkot – egy igen sok paraméteres és nagyon nehezen modellezhető világban élünk. Hogy mennyire komplex a jelenségkör, mutatja, hogy évi mintegy 20 ezer cikk jelenik meg

klímaváltozással kapcsolatos témakörben. Attól, hogy a CO₂ valóban okoz üvegházhatást, és a koncentrációja valóban nő a légkörben, még korántsem biztos, hogy ez okozza a klímaváltozást, mint ahogy az sem, hogy mindez az emberi tevékenység következménye. Egy analógiával élve: sokáig az orvosok között széles körben elterjedt nézet volt, hogy a magas koleszterinszint okozza a szív- és érrendszeri betegségeket, ezért elég a koleszterinszintet megfelelő értéken tartani, és megoldódik a probléma. Mára evidens, hogy a kérdés ennél sokkal összetettebb, nem lehet egyetlen jelenségek köré okolni, különösen egy olyan komplikált rendszerben, mint az emberi szervezet – vagy éppen a földi klíma.

És ha már a klímaváltozás korát éljük, az is lényegében lehetetlen, hogy ennek kizárólag negatív következményei legyenek. Úgy tűnik, ahogy a pszichológiában létezik az „irreális optimizmus” fogalma, amely szerint velünk semmi rossz nem történhet, a globális jövőképet inkább az „irreális pesszimizmus” uralja, amely szerint velünk semmi jó nem történhet. A valóság azonban jóval inkább az, hogy, mint minden változásnak, ennek is vannak pozitív és negatív oldalai. A túlélés szempontjából pedig elengedhetetlen, hogy a pozitív hatásokra rámutassunk, azokra ráerősítsünk.

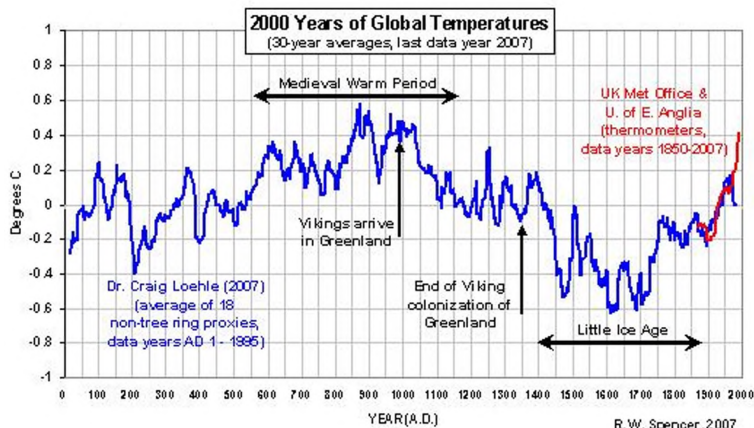
2. MELEGEDŐ FÖLD

Az első kérdéskör, amit tisztázni kell, hogy valóban milyen mértékű a mai felmelegedés. Ha az utolsó 150 év történetét nézzük, akkor a következő képet látjuk.



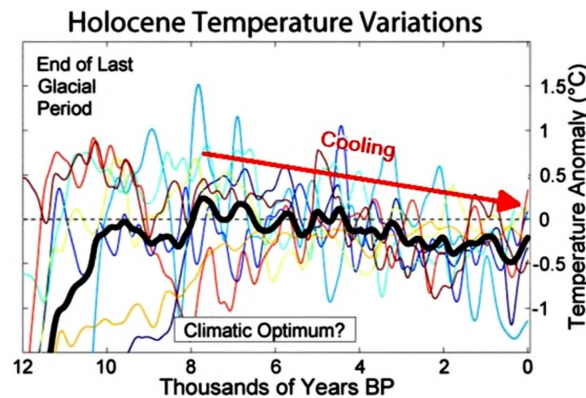
(forrás: <http://berkeleyearth.org/archive/2019-temperatures/>)

Ezen az ábrán a referenciapont (0.0 a függőleges tengelyen) az 1980-as év, ahhoz képest 2020-ra a Föld légkörének átlagos melegebbé kb. 0,8 °C volt. Érdekes megfigyelni, hogy az 1940-es években a globális trend megtörni látszott, és egy ideig a visszaforduló jégkorszak is lehetséges alternatívának tűnt. Ha hosszabb



(forrás: <https://weatherstreet.com/weatherquestions/Roy-Spencer-on-global-warming.htm>)

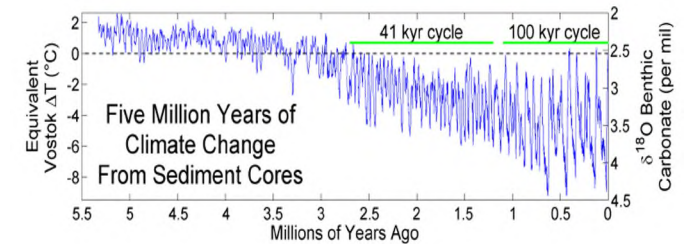
időtartamot akarunk felölelni, akkor megnézhetjük az elmúlt 2 ezer év történetét. Az ábra alapján a középkori meleg időszak és az azt követő kis jégkorszak hőmérsékletei között jó 1 °C volt. A hőmérséklet ingadozása tehát nem teljesen új keletű, azonban annak időskálája (50 év az 500 évvel szemben) arra utalhat, hogy ma egy nem szokásos időszakot élünk. Még hosszabb időskálán az elmúlt 12 ezer év, az utolsó jégkorszak utáni interglaciális időszak klímáját is megvizsgálhatjuk.



(forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_temperature_record).

Az ábrán feltűnően sok görbe látható, amely a hőmérséklet becslésének különböző „proxijait” jelenti, azaz hogy milyen megfigyelésekből következtetünk a Föld átlaghőmérsékletére (https://en.wikipedia.org/wiki/Proxy_%28climate%29). A vastag fekete vonal az átlaguk, ennek pontos értékeit nem szabad készpénznek venni, azonban a globális trendet jól mutatja. Ennek alapján az utolsó jégkorszak után a földi klímát folyamatos hűlés jellemzi (amely egyébként együtt járt egy folyamatos kiszáradással, pl. a Szahara elsivatagosodásával, <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/green-sahara-african-humid-periods-paced-by-82884405/>), az egyes modellekben a maximális és minimális hőmérséklet különbsége akár 2-2,5 °C is lehetett. Mindazonáltal a klíma meglehetősen stabil maradt, ami lehetővé

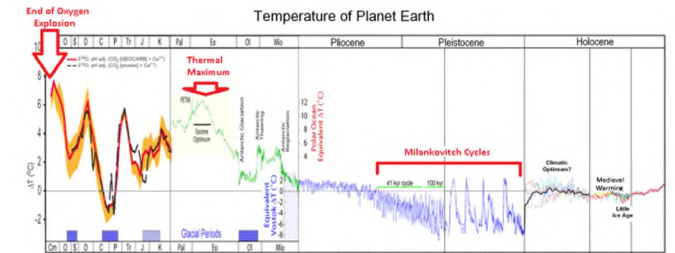
tette a földművelő civilizációk kialakulását 5–10 ezer évvel ezelőtt. Még pár időskálával feljebb haladva nézzünk rá az utóbbi 5 millió éves klímátörténetre.



(forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Global_temperature_record)

Ezen a képen a nulla szint az északi félgömbön megjelenő állandó szárazföldi jég kialakulását is jelenti, ez kb. 3 millió évvel ezelőtt történt. Mikor a globális átlaghőmérséklet a referencia-nullaszint alá süllyedt, akkor erősödtek fel és váltak szabályossá az eljegesedések, amelyek eleinte kb. 40 ezer évente, később kb. 100 ezer évente ismétlődtek.

Végül nézzünk rá mindezen adatok összefoglalásaként az utóbbi 500 millió év történetére.



(forrás: <https://muchadoaboutclimate.wordpress.com/2013/08/03/4-5-billion-years-of-the-earths-temperature/>)

A mai érték +0,8 °C körül van, amely kb. megegyezik a 8 ezer évvel ezelőtti hőmérséklettel. De amit látunk az ábrán, hogy ilyen hideg csak az utóbbi 3 millió évben van a Földön, amely kb. 15 millió év óta folyamatos hűlésben van. A Földön állandó jégta- karó a sarkokon (ezt hívjuk valójában jégkorszaknak) kb. 40 millió éve jelent meg, és a Föld történetének igen ritka korszakait

jellemzi. A Föld legtermékenyebb időszakaiban az átlaghőmérséklet a mai értékénél 2–4 °C-kal melegebb volt. A fenti ábrán kék csíkokkal vannak jelezve azon időszakok, amikor globális kihalási folyamatok zajlottak. Az egyik legelső lehetett az 500 millió évvel ezelőtti „oxigénrobbanás”, amely az oxigéntermelő mikroorganizmusok megjelenését követte. Ez nem csupán mérgező légkört teremtett a korábbi élőlények számára, de a Föld drasztikus lehűlésével is járt: ez a „hóglyó-Föld” időszaka (<http://www.snowballearth.org/what.html>), amikor az Egyenlítőnél is a mai Antarktisz klímája uralkodott több millió évig. Az egyik legnagyobb kihalási folyamat a perm és triász között zajlott, amikor a fajok 80%-a pusztult ki. Amit itt érdemes megfigyelni, hogy a kihalási folyamatok a földi klíma drasztikus csökkenésekor következtek be, a hőmérséklet növekedése mindig virágzó életet jelentett.

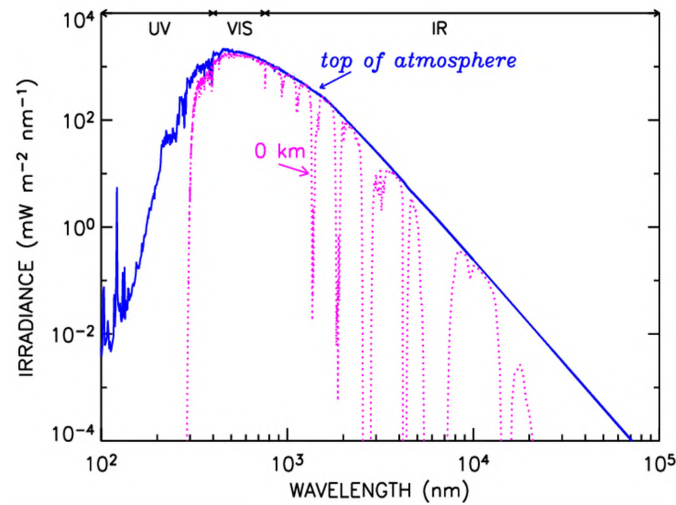
3. AZ ÜVEGHÁZTÁS ÉS A CO₂ SZEREPE

A fentiek alapján látható, hogy a mai, melegen mondott időszak korántsem példátlan a Föld történetében, sőt, ez a hőmérséklet inkább a hidegebb időszakokra volt jellemző. A korábbi melegebb időszakokat nyilvánvalóan nem emberi működés okozta. De vajon milyen mechanizmusok játszanak szerepet a klíma kialakításában?

A klímát alapvetően a Nap által besugárzott energia és a kisugárzott hő egyensúlya állítja be. A Nap felszínén ez kb. 60 millió W/m²-es energiaáramlást (fluxust) jelent (https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_energy_to_the_Earth), amely egyenesen „hígul” a távolsággal (1/r²-es törvény alapján), és mire a Földre ér, átlagosan 1367 W/m²-es értékre áll be (ez a „napállandó”).

A napsugárzás sokféle színű (frekvenciájú) fény keverékéből áll, amit könnyen láthatunk, ha prizmával felbontjuk a fényt. A különböző frekvenciákon szállított energia eloszlása ideális esetben a feketetest-sugárzást leíró Planck-görbével jellemezhető. Azonban a légkör jelenléte megváltoztatja ezt az eloszlást: a Nap légkörében jelen levő gázok miatt bizonyos hullámhosszú sugárzások elnyelődnek, így a színek nem folytonos lesz, hanem fekete vonalak jelennek meg benne (elnyelési színek). Ugyanez történik a Föld légkörében: mivel itt sokkal több az

olyan gáz, amely képes sugárzást elnyelni, illetve visszatükrözni, a Föld felszínére egy bonyolult spektrumú fény érkezik, amely az eredeti energiának kb. 70%-át tartalmazza csupán.

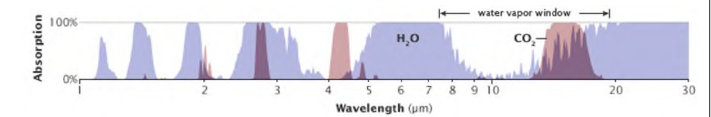


Ha a Földnek nem lenne légköre, akkor a Naptól érkező energiaáram kizárólag a felszínen nyelődne el, és sugárzással lépne ki ismét. A bejövő és kimenő energiák egyenlők volnának, ennek hatására a Föld felszíni hőmérséklete kb. -18 °C lenne (https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect). A „hóglyó-Föld” időszakban, amikor a légkörből eltűnt a CO₂ és a lehűléssel a vízgőz is, nagyjából ilyen átlaghőmérséklet lehetett, pontosabban még alacsonyabb, mert a hótakaró miatt a Föld fényvisszaverő képessége (albedója) is megnőtt, ezért 70%-nál még kevesebb melegítette a Földet.

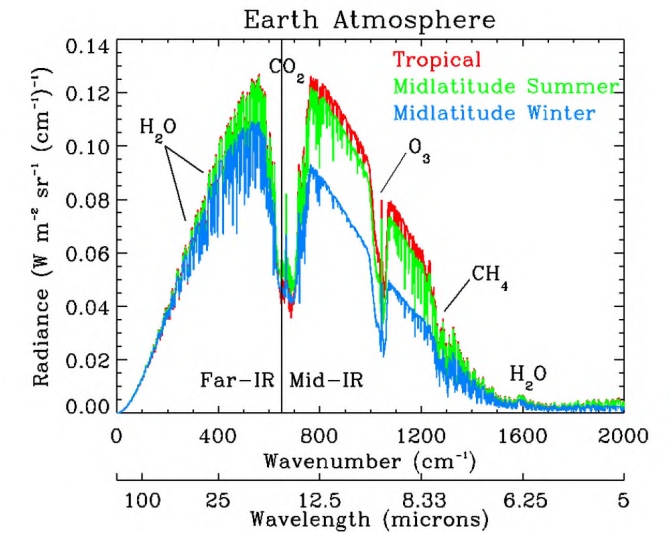
A Föld felszínén és légkörében elnyelődő sugárzás hővé alakul, amely ismét feketetest-sugárzást bocsát ki, azonban más hőmérséklettel, így más eloszlással is, mint a Nap fénye. A Nap Földet elérő sugárzása egy effektív 3200 K-es hőmérsékletnek felel meg, a sugárzás csúcsa a közeli infravörösben, kb. 0,8 μm-nél van. A Föld felszíne átlagosan 288 K hőmérsékletű (<https://objectivistindividualist.blogspot.com/2014/06/simple-explanation-of-why-greenhouse.html>), itt a sugárzás csúcsa kb. 15 μm-nél van. Ebben a tartományban elsősorban a vízgőznek és a CO₂-nek van jelentős elnyelése (https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect).

Számszerűen a vízgőz a teljes energiaelnyelés 30–75%-ért felelős, a CO₂ a 9–25%-áért, a metán a 4–9%-ért, az ózon 3–7%-ért, míg a többi gáz nem jelentős ezen a hullámhossztartományon.

Mindezek miatt a Földet elhagyó sugárzás spektruma torzul, és ez ballonkísérletekkel mérhető is (<https://earthzine.org/the-far-infrared-spectroscopy-of-the-troposphere-first-instrument-new-technology-for-measuring-earths-energy-balance-and-climate-change-2013-earth-science-technology-showcase/>).



Tiszta égboltnál, azaz minimális vízgőzelnyelésnél az alábbi ábrát találjuk.



Milyen következtetést vonhatunk le ebből? Mielőtt a pontosabb elemzést elvégeznénk, hozzunk egy egyszerűbb példát. Vegyünk egy épületet, amely állandó hőmérsékletű külső környezetben van, és amelyet belül egyenesen fűtünk Q hőteljesítménnyel. A falakon át történő hővesztesség arányos a benti és kinti hőmérséklet különbségével (T-T₀), valamint a fal felületének nagyságával (A). Egyensúly akkor van, mikor a hővesztesség és a termelt hő egyenlők, képletben Q=kA(T-T₀), ahol az arányossági tényező az átlagos hővezetési együttható (κ). Ha jobban fűtünk, akkor melegebb lesz, ez világos. De akkor

is melegebb lesz, ha a hó kisebb effektív felületen tud eltávozni, vagyis például szigeteljük a ház egyik falát.

A légkörben az A felület szerepét azon hullámhosszok játszószák, amelyeknél nincs a légkörben elnyelés. Ha nulláról meg-növelem a CO₂ mennyiségét a légkörben, akkor ezzel a hőá-tadás „felületét” csökkentem, ezzel növelem a belső, azaz a Föld felszíni hőmérsékletét.

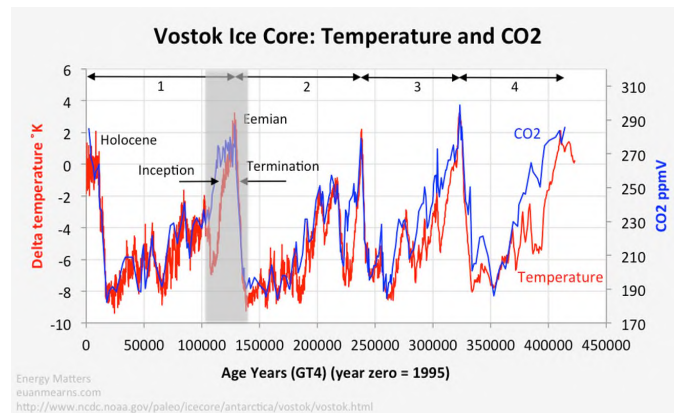
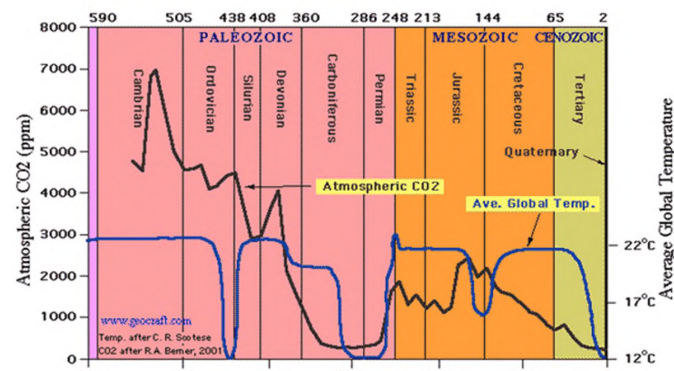
A Föld esetében pontosabb megfogalmazásban a következő történik. Vegyük a Föld felszínére másodpercenként beérkező energiát egységnyiére. Ha a Földnek nem lenne légköre, akkor ez olyan földfelszíni egyensúlyi hőmérsékletet eredményezne, amelynek hőmérsékleti sugárzása éppen elviszi a beeső energiát. A hőmérsékleti sugárzás a hőmérséklet negyedik hatványával arányos energiaáramot ad: $P \sim T^4$. Válasszuk az egységeket úgy, hogy ezáltal egységnyi legyen a Föld felszíni hőmérséklete. Ha most ebből bizonyos hullámhosszokon nem tud kimenni hő, akkor ugyanazt a kimenő energiaáramot nagyobb hőmérséklettel tudjuk csak elérni. Ha pl. a sugárzás fele elnyelődik, akkor ez megfelel annak a hőmérsékletnek, amelyre a beeső egységnyi energiaáramot a T hőmérsékletű feketetest-sugárzás energia-áramának fele fedezi: $1=0.5T^4$, azaz $T \approx 1.18$. Így tehát 18%-kal emelkedik a Föld felszíni hőmérséklete. Ez az üvegházhatás.

A kisugárzott spektrumból látható, hogy a CO₂ jelenlétének jelentős a hatása, az adott hullámhosszokon az energia kb. 60%-át elnyeli. Ez a teljes energiaáram (minden hullámhossz) 15%-ának felel meg, amely mintegy 4%-nyi hőmérséklet-növekedést okoz. Vagyis a CO₂ miatt kb. 10 °C-kal van melegebb, mint a hógolyó-Föld esetén. Ha nem lenne vízgőz, ez kb. -8 °C-os átlaghőmérsékletet jelentene. A Föld mai átlaghőmérséklete 15 °C, a maradékot a vízgőz átlagos szigetelése okozza.

Mi történne, ha a CO₂ koncentrációját jelentősen növelnénk? Az abszorpciós ábráról látható, hogy a CO₂ elnyelése már most is maximális a saját hullámhossz-tartományában, vagyis itt tökéletesen szigetel. Az épületszigetelési példánkban a CO₂ koncentrációjának növelése annak felel meg, hogy arra a falra, amely már amúgy is szigetelve volt, újabb szigetelést rakunk. Miután ezen a falszakaszon már eddig sem távozott hő, az újabb szigetelés jelenléte semmit nem fog okozni.

A Föld esetében kissé bonyolultabb a helyzet, mert sugárzások energiavesztés mellett még a légkör mozgásából adódó (konvektív) energiacsere is jelen van. Ez azonban csak csökkenti a szigetelés hatásosságát, azonban továbbra is igaz marad, hogy további szigetelés felhelyezése nem jár következménnyel. Mindez azt jelenti, hogy a CO₂ koncentrációjának növekedése már nem nagyon vezethet további hőmérséklet-emelkedéshez.

Ennek alapján azt gondolhatjuk, hogy a CO₂ bizonyos koncentráció fölött már nem befolyásolja a klímát. És valóban, a Föld klímátörténetének vizsgálata azt mutatja, hogy a CO₂-koncentráció és a Föld hőmérséklete nem korrelál szorosan.



(<https://www.discovermagazine.com/environment/heres-what-real-science-says-about-the-role-of-co2-as-earths-preeminent>,

<http://euanmearns.com/the-vostok-ice-core-and-the-14000-year-co2-time-lag/>)

4. A KONTINENSEK HELYZETE ÉS A KLÍMA

A fentiekben lényegében azt láttuk, hogy az üvegházhatás ugyan lényeges szerepet játszik a klíma kialakításában, a CO₂-koncentráció pontos értéke azonban nem számít. De akkor ugyan mi befolyásolja a Föld klímáját?

A kérdés természetesen rendkívül bonyolult, és senki nem tudja a pontos választ. Szerepet játszhatnak csillagászati hatások, mint a Föld tengelyének iránya, a Föld pályája, a Nap aktivitása (<https://climate.nasa.gov/news/2948/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>). De szerepet játszhatnak földi jelenségek is, és ezek közül a legfontosabbnak tűnik a kontinensek elhelyezkedése.

Az egyik effektus, ami a szárazföldek elhelyezkedéséből következik, az a Föld átlagos albedója. Az albedó a napsugárzás-visszaverési képesség, amely 1, ha minden sugárzást visszaver a felület, és 0, ha mindent elnyel. Az albedó tehát direkt módon befolyásolja a Föld felszínére érkező hasznosuló energiát, és az optimális esethez képest $T=(1-a)^{0.25} T_0$ lesz az átlaghőmérséklet. A friss hó albedója például akár 0,9 is lehet (<https://en.wikipedia.org/wiki/Albedo>), ami azt jelenti, hogy mindössze 10%-ot nyel el a besugárzott energiából. Ilyen albedójú bolygó hőmérséklete mintegy 40%-kal alacsonyabb, mint egy jégmentes bolygóé. A jég kialakulása ugyanakkor pozitív visszacsatolással jár: ha megnő a jég területe, megnő az albedó, csökken a hőmérséklet, ami további eljegesedéssel járhat. Ez olyan instabilitáshoz vezethet, ami a teljes Föld befagyásával járhat (<http://www.snowballearth.org/cause.html>).

Az óceán energiaelnyelő képessége igen magas, albedója tipikusan 0,06 (<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/processes/albedo.html>), azaz mindössze 6%-ot ver vissza a rá eső sugárzásból. A szárazföld tipikusan 0,3 albedóval rendelkezik (<https://en.wikipedia.org/wiki/Albedo>). Ez azt is jelenti, hogy ha a trópusi területeken sok a szárazföld, akkor a hasznosítható energia lecsökken, és ez a Föld átlaghőmérsékletét is csökkenti. Egyes kutatók szerint ez vezethetett a hógolyó-Föld kialakulásához (https://www.crediblehulk.org/index.php/2016/10/03/plate_tectonics_part_i/).

A kontinensek helyzetének van más következménye is, amely a Föld különböző területei közötti hőcserét érinti. Hőcsere lehetséges légköri mozgással és tengeráramlással. A hőcsere

szerepe az, hogy ha van egy effektív mechanizmus arra, hogy a trópusokon beérkező energiát átszállítsa a sarkok felé, akkor ezzel a sarkok jégtakaróját meg tudja olvasztani, a Föld átlagos albedóját pedig csökkenti, és így a Föld melegedéséhez vezet.

Ha megfigyeljük a jelenlegi klímaváltozás során az északi- és a déli-sarki jég mennyiségét, akkor a következőt látjuk (https://19january2017snapshot.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-antarctic-sea-ice_.html, <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-arctic-sea-ice>).

A felső ábra az Antarktisz, az alsó az Arktisz jégfedettségét mutatja. Az utóbbi 40 évben a déli-sarki részen lényegében állandó maradt a jégtakaró nagysága, míg az északin erőteljesen olvad. A jelenlegi trendek mellett 20–40 év múlva nem lesz nyáron jég az Északi-sarknál. Az északi-sarki tartomány a leginkább érintett a globális felmelegedésben, 2-3-szor akkora a

felmelegedés üteme, mint máshol a Földön (<https://climate.nasa.gov/news/3023/2020-arctic-sea-ice-minimum-at-second-lowest-on-record/>). Ezek a tények arra utalnak, hogy akár a klímaváltozás megértésének a kulcsa is lehet az Északi-sarkvidék vizsgálata.

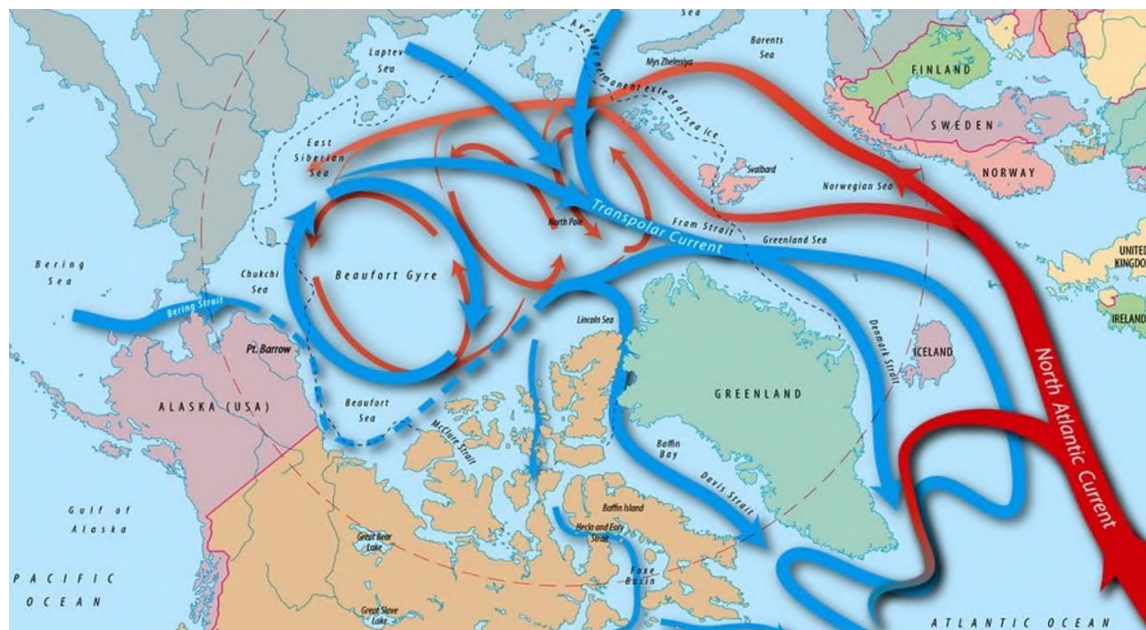
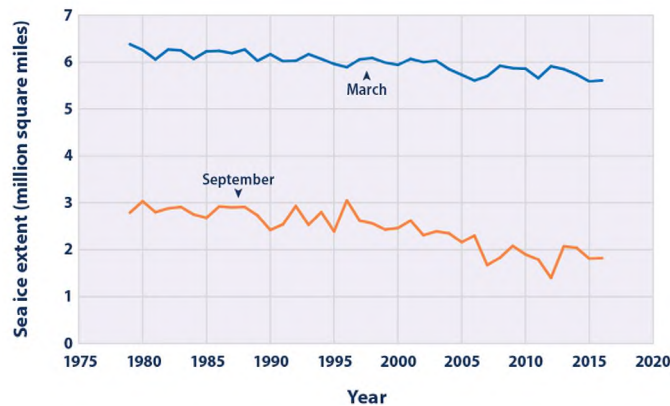
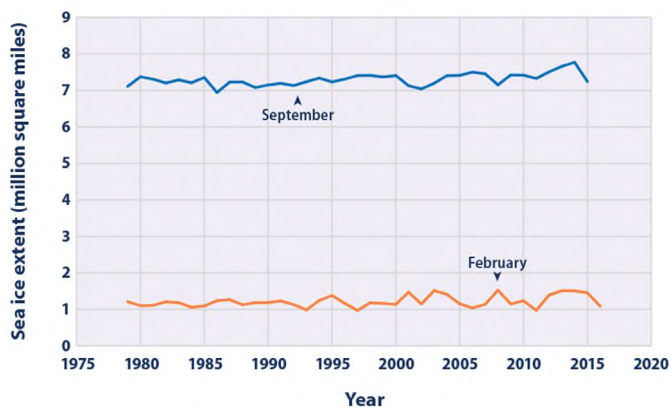
Az Északi- és Déli-sarkvidék között a legfontosabb különbség, hogy az Északi-sarkvidék tenger, míg a déli szárazföld. Ezért az északi-sarki jég alá befuthatnak tengeráramlatok. Az alábbi ábra mutatja az Észak-atlanti áramlat (Golf-áramlat) menetét (<https://www.whoi.edu/know-your-ocean/ocean-topics/polar-research/>).

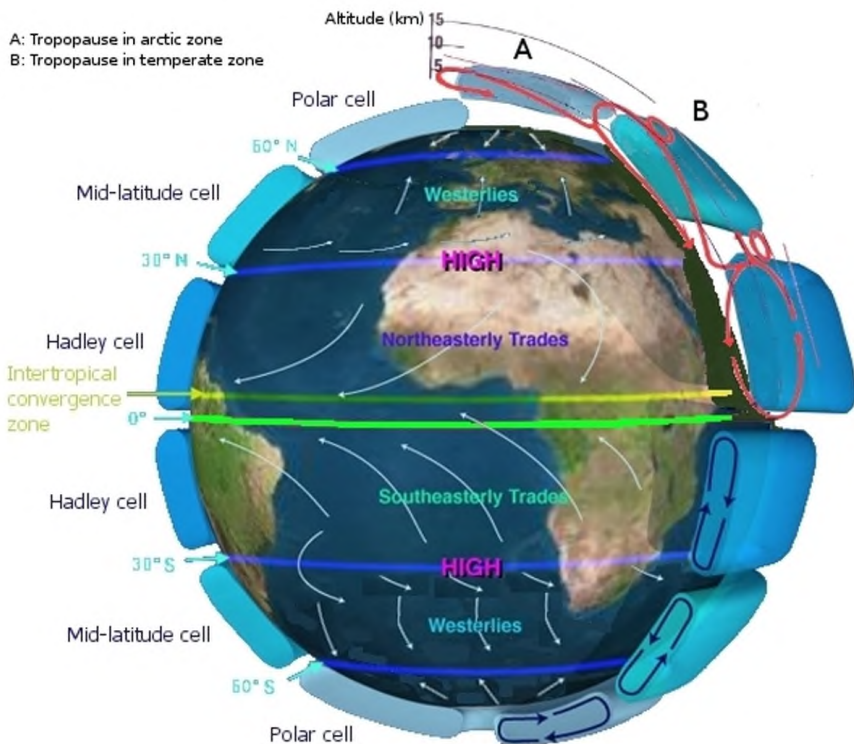
Ahogy látható, a meleg áramlat a sarki jég alá befut, ott lehűl, ezzel melegítve a sarki jeget. Az áramlatokban bekövetkező változások tehát erősen érintik az északi-sarki jég olvadását. Sőt: amennyiben a jég olvad, ez csökkentheti az ellenállást a sarkok felé futó tengeráramlatok előtt, és ez pozitív visszacsatolással olvasztja a jégtakarót. Miután itt egy pozitív visszacsatolásról van szó, kis változások beindíthatják a folyamatot, pl. az, hogy az Atlanti-óceán szélesedik évi 1–10 cm-nyit.

Az adatokból úgy tűnik, hogy az északi-sarki tartományba valóban egyre több és több hőáram érkezik délről (<https://science.sciencemag.org/content/331/6016/450.full>, <https://www.msn.com/en-gb/weather/topstories/growing-heat-blob-from-atlantic-driving-sea-ice-loss-in-arctic-study-says/ar-BB1bhsQv>).

A másik nagy hőcserélő rendszer a globális légköri áramlások. Jelenleg a Földön három nagy légköri áramlat van (https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_circulation). A trópusokon belépő hőenergia felmelegíti a levegőt, amely felszáll, a sarkok felé áramlik, majd a térítőknél közelében éri el a földet (Hadley-cella). A Ferrel-cella a 60. szélességi kör közelében száll fel, és szintén a térítőknél száll le. A harmadik a sarki cella, amely a 60. szélességi körnél a sarkok felé fordul, a pólusok közelében száll le. Létezésük következménye, hogy a trópusokon és a 60. szélességi kör közelében sok csapadék hullik az állandó felszálló áramlás miatt, a térítőknél és a sarkoknál viszont a csapadék mennyisége csekély. Ugyanakkor a légköri áramlások hatalmas energiamennyiséget képesek szállítani (200-300 terrawatt teljesítményűek), ezért klímaki egyenlítő szereppel is rendelkeznek.

Ezen áramlási kép lényegében annak a következménye, hogy az egyenlítői légtömegeknek nagy perdületük van a Föld forgása miatt, és amikor a sarkok felé vándorolnak, amennyiben a perdület megmarad, egyre nagyobb keleti irányú sebességre tesznek szert, és előbb-utóbb a keleti irányú sebességkomponens nagyobb lesz, mint az észak-déli. A teljes sebesség csillapítása miatt végül a sarkok felé áramlás megszűnik, és a





levegő lassan lehűlve leszáll. Hogy ez pontosan hol történik, az azonban a részletektől függ, elképzelhető lenne, hogy egyetlen nagy leszálló áramlat uralná az sarkvidékeket. Ez a helyzet a Vénusz légkörében: ott a Hadley-cella a sarkköröknél száll alá, és a sarkvidéken turbulens légáramlatok jellemzők (https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Venus). Ez a Földön is lehetséges lenne, ha a trópusi légtömegek nagyobb magasságba emelkednének (<https://www.seas.harvard.edu/climate/eli/research/equable/hadley.html>). Talán ez a magyarázata annak, hogy bár a Napból érkező hőáram mindig is kicsi volt a sarkok körül, mégsem alakult ki állandó jégtakaró a Föld történetének nagy részében.

5. CSAPADÉK ÉS ELSIVATAGOSODÁS

A klímaváltozás egyik negatív következményeként szokták említeni az elsivatagosodást (<https://en.wikipedia.org/wiki/Desertification>), amely többek között a Szaharában, Argentínában, Mongóliában okoz

komoly gondokat. Ugyanakkor a várakozásunk mégis az, hogy az emelkedő hőmérséklet több vizet párologtat el, azaz élénkebb a víz körforgása, ami miatt több eső is kell eszen. És valóban, a globális adatok is ezt mutatják (<http://clivebest.com/blog/?p=8502>): a csapadék mennyisége ugyanolyan módon emelkedik, mint az átlaghőmérséklet. Az átlagosan több csapadék és a megemelkedett CO₂-mennyiség globálisan a növényzet megerősödését hozta magával, és ezt még a világuőrből is lehet látni (<https://climate.nasa.gov/news/2436/co2-is-making-earth-greener-for-now/>).

Az elsivatagosodás tehát nem a kevesebb csapadékmennyiség, hanem a változó csapadékeloszlás miatt következik be. A globális trend, amely emögött húzódik, az a trópusi légköri cella kiszélesedése (<https://www.nature.com/news/the-mystery-of-the-expanding-tropics-1.19271>). A megfigyelések szerint a Hadley-cella leszálló ága észak felé vonul évtizedenként 0,25–0,5 fokot. Ennek következtében a térítőkkal határos te-

réletek egyre szárazabbak lesznek, ez érinti például Spanyolországot vagy Kaliforniát is. Ugyanakkor a trópusi övezetben, valamint Észak-Európában vagy az USA északi részén több csapadék hullik. Magyarország a két zóna határán van, bár az utóbbi 110 évben mintegy 10%-kal csökkent a csapadék mennyisége (https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/csapadek/).

A trópusi öv kiszélesedése mögötti ok nem igazán ismert. Biztosan köze van hozzá a klímaváltozásnak (<https://phys.org/news/2020-08-tropics-climate-primary-culprit.html>), bár a Szahara 6–9 ezer évvel ezelőtt még termékeny szavanna volt, és a klíma hűlésével együtt száradt ki. Lehetséges, hogy csillagászati tényezők is szerepet játszanak, ugyanakkor a direkt emberi tényezők sem hanyagolhatók el, mint a túllegeltetés, az erdők kivágása, a talajvíz túlhasználata.

Magyarországon például a folyók XIX. századi szabályozása és a túllegeltetés olyan következményekkel járt, hogy a

korábban erdős vagy vegetációval fedett területek sivatagosodni kezdtek (<https://molnar-v-attila.blogspot.com/2014/02/dr-varga-zoltan-professor-az-akacrol.html>). A korábbi nedves rétek helyét száraz, sokszor szikes, terméketlen talaj foglalta el. 1923-ban született az az erdőtelepítési törvény, amely 110 ezer hektár futóhomokos, szikes terület elsivatagosodását állította meg fák és szőlő betelepítésével.

A futóhomok megkötése, a növényzet és lehetőleg fák telepítése máshol is hatékony fegyvernek bizonyult az elsivatagosodás elleni küzdelemben (ld. pl. <https://www.rapidtransition.org/stories/how-china-brought-its-forests-back-to-life-in-a-decade/>, <https://www.naik.hu/hirek/a-magyar-akac-azsiban-segit-az-elsivatagosodas-elleni-kuzdelemben>). Észszerű zöldítési és öntözési programmal, a legeltetés szabályozásával és természetvédelemmel remélhetőleg megállítható az elsivatagosodás folyamata.

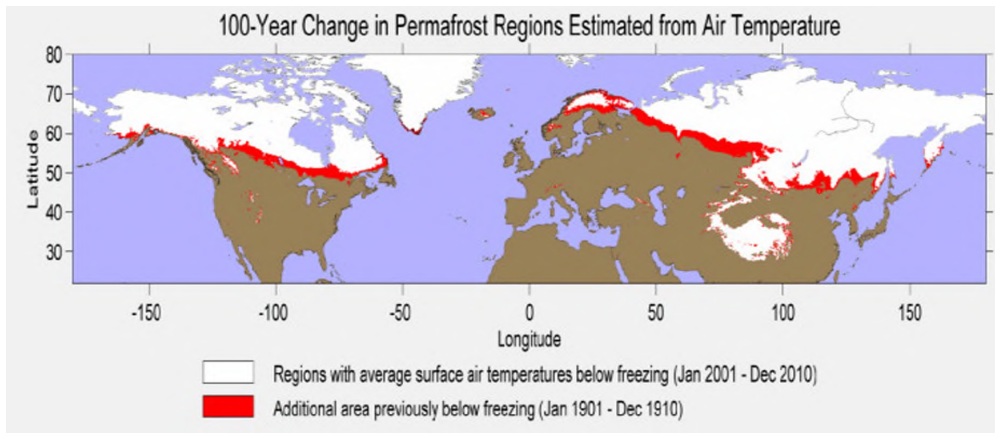
Bár a sivatagok elvesznek értékes termőterületeket az embertől és élőhelyeket az elővilágtól, ugyanakkor vannak a Földnek olyan területei, ahol épp ellenkező folyamatok zajlanak. Az állandó jéggel fedett területek csökkennek, ld. pl. az alábbi ábrát (<https://www.klimafakten.de/meldung/kurven-karten-zahlen-zum-klimawandel>).

A felszabaduló területek nagy lehetőséget kínálnak a mezőgazdaságnak, különösen, mivel új, szennyezetlen, tápanyagokban gazdag termőterületek kerülhetnek művelés alá. Az Északi-sarkvidéken megszűnő jég a kereskedelem szempontjából is kedvező, Ázsia, Európa és Amerika hirtelen sokkal közelebb kerül egymáshoz. De nem csupán a permafroszt-tartományokon javulnak a mezőgazdaság feltételei. Európában a felmelegedés miatt a melegigényes növényfajokat egyre északabbra lehet termesztetni. Erre példa a szőlő, ahol már most meg lehet figyelni a borrhégiók északabbra tolódását (<https://qubit.hu/2017/11/27/a-bor-es-a-klimavaltozas-magyar-rizling-helyett-jon-a-sved>).

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben megpróbáltam némileg önkényes válogatással kiemelni azokat a pontokat, ahol a klímaváltozás témakörében az általános vélekedéssel szemben a tudományos vizsgálat árnyaltabb képet sugall.

Talán a legérdekesebb az, hogy az üvegházhatás mechanizmusának pontosabb vizsgálata arra enged következtetni, hogy nem a CO₂ légköri koncentrációjának emelkedése hajtja



a klímaváltozást, inkább csak következménye annak. Feltehetőleg a klímaváltozás oka sokkal robusztusabb ennél.

Az a tény, hogy a felmelegedés leginkább az Északi-sarkvidéket érinti, ott a világtáznál jóval nagyobb mértékű, azt sugallja, hogy a felmelegedés okát is ezen a területen kell keresni. Az északi-sarkköri tengeri jég oladásának oka lehet például az Észak-atlanti áramlat (Golf-áramlat) kismértékű változása, amely például az Atlanti-óceán kiszélesedése miatt következhet be. Bár a változás lassú, azonban a jég oladásában pozitív visszacsatolások játszanak szerepet, amelyek a kritikus hőtranszport elérésekor gyors, fázisátalakulás-szerű változásokat eredményezhetnek.

A harmadik téma, amit érintettem, a csapadék helyzete a klímaváltozás során. A közvélekedéssel ellentétben a globális csapadékmennyiség nő, és a Föld globálisan egyre zöldebb, a levélfelület csaknem mindenütt növekedett. Vannak azonban területek, amelyeket fenyeget az elsivatagosodás, ez a trópusi légáramlási övezet kiszélesedése miatt történik, ennek oka azonban nem igazán ismert.

Mindentől függetlenül a klímaváltozás realitás, és negatív következményeivel küzdeni kell. Azonban a CO₂-kibocsátás csökkentése feltehetőleg semmi hatással nem fog járni, az erre fordított pénz elvesztegetett erőforrást jelent. Ehelyett a legveszélyesebb jelenséggel, az elsivatagosodással kéne szembenézni, ahol zöldítéssel, észszerűbb vízgazdálkodással és mezőgazdasággal nagyon sokat lehetne javítani a jelenlegi állapotokon. Ha a CO₂-kibocsátás elleni meddő küzdelem helyett erre fordítanánk a meglévő erőforrásainkat, akkor bolygónk kilátásain is jelentősen javíthatnánk.

Energiahatékony alacsony nyomású technológia

A ZS VSD+ csavarelemes fúvók 30%-kal csökkentik az energiaköltségeket a hagyományos forgódugattyús fúvókhoz képest.

Az ISO 8573-1 Class 0 tanúsítvánnyal rendelkező térfogat-kiszorításos, csavarelemes fúvókkal nem áll fenn a szennyeződés és a termelés kiesés kockázata.

A fejlett vezérlőrendszer maximalizálja a fúvóberendezés megbízhatóságát. Szervizkijelzők, hibariasztások és biztonsági leállítások segítségével figyeli a rendszer általános teljesítményét.

A ZS (VSD+) berendezéseink rendkívül alacsony zajszinten működnek a nyitott forgódugattyús fúvókhoz képest.

- Térfogatáram: 300 – 9.200 m³/h
- Nyomástartomány: 0,3 – 1,5 bar
- Motor teljesítmény: 18 – 355 kW

www.atlascopco.hu