

A globális felmelegedés mérséklésére irányuló geomérnökségi módszerek bemutatása

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGIA SPECIALIZÁCIÓ



Készítette:

Bense Bálint

Témavezető:

Dr. Kis Anna

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2021

NYILATKOZAT

Név: Bense Bálint

ELTE Természettudományi kar, szak: földtudomány Bsc


NEPTUN azonosító: BWJ6WW

Szakedolgozat címe:

A globális felmelegedés mérséklésére irányuló geomérnökségi módszerek bemutatása

A **szakdolgozat** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézetek standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2021. december 14.

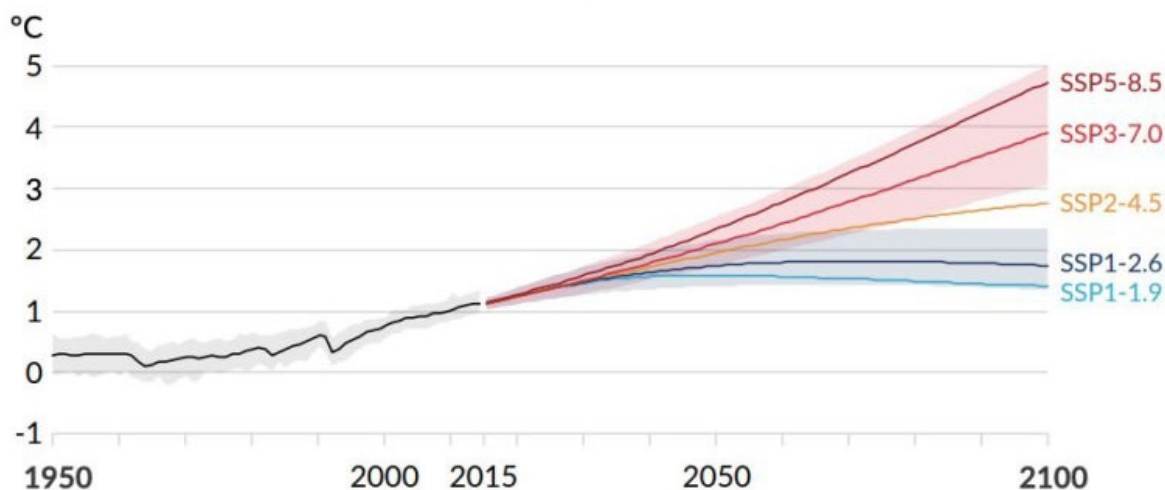

a hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. A globális felmelegedés mérséklésére irányuló módszerek	7
2.1. Napsugárzás-menedzsment.....	8
2.1.1. Sztratoszférikus Aeroszol Injekció.....	9
2.1.2. Tengeri Felhő Fehérités.....	10
2.1.3. Cirrus Felhő Vékonyítás	13
2.1.4. Talajmenti Albedó Módosítás	14
2.1.5. Mikrobuborékok/Tengeri Hab Készítése	15
2.2. A szén-dioxid kivonására irányuló módszerek.....	17
2.2.1. Szén-leválasztás és –Tárolás	17
2.2.2. Közvetlen Légbefogás.....	19
2.2.3. Óceán „trágyázás”	20
2.2.4. Fokozott Mállás.....	21
2.2.5. Fejlesztett Fotoszintézis	22
2.2.6. Mesterséges Felemelés.....	23
3. A geomérnökség hátrányai	25
4. Összegzés.....	27
Köszönetnyilvánítás.....	29
Irodalomjegyzék	30

1. Bevezetés

A globális klímaváltozás egyre erősebb hatással van a mindennapjainkra. Gyakoribbak a hőhullámok, erdőtüzek, hurrikánok és egyéb természeti katasztrófák. Az ipari forradalom kezdete óta a Földön a felszíni átlaghőmérséklet emelkedése már meghaladta az 1 °C-ot (*WMO*, 2021). Így a globális felmelegedés hatásai egyre inkább kézzelfoghatóbbak, egyre nagyobb befolyással vannak ránk nap, mint nap. Az éghajlatváltozással sűrűbbé váló környezeti katasztrófák pedig általános elégedetlenséget válthatnak ki a társadalomban. A hőhullámok több megbetegedést és halálesetet okoznak, ami többletterhelést jelent az egészségügyre, a hosszabban tartó szárazságok korlátozott ivóvíz-hozzáféréshez és a természetlagok romlásához vezethetnek, ami pedig az élelmiszerellátás biztonságát fenyegeti. A nélkülöző emberek, akik már hozzászoktak egyfajta jóléthez, hajlamosabbak a rendet fenntartó szervek ellen fordulni az elégedetlenségük miatt. Ez ahhoz vezet, hogy a világ vezető tudósainak és politikusainak újabb és újabb megoldások után kell kutatni, hogy az emberek elégedetlensége ne torkolljon nagyobb katasztrófába, például egy háborúba. Azonban amíg nem rendelkezünk megvalósítható végleges megoldással, ami kielégíti a társadalmi, gazdasági és környezetvédelmi igényeket is, ezzel megvalósítva a fenntartható fejlődést, addig időt kell nyernünk és a lehető leghatásosabban lelassítani a klímaváltozás folyamatait. Ehhez nyújthat segítséget a climate- vagy geoengineering, magyarul klíma- vagy geomérnökség. Ugyanis az eddigi eredmények, melyeket a klímavédelem „hagyományos” területein (pl.: megújuló energiaforrások bevezetése, környezetvédelmi törvények elrendelése, közlekedés elektromobilitás felé való terelése) sikerült elérnie az emberiségnek, nem lesznek elegendőek ahhoz, hogy a globális hőmérséklet emelkedését megállítsuk 1,5 °C-nál, de az eddigi szcenáriók többsége alapján 2 °C-nál sem valószínű, hogy megáll a hőmérsékletnövekedés (1. ábra), hacsaknem radikális lépéseket tesz az egész emberiség. Ebből kifolyólag a társadalomnak vagy gyökeres változáson kell átmenni a következő 1-2 évtizedben vagy új, innovatív megoldásokkal kell kezelnie a fennálló problémákat.



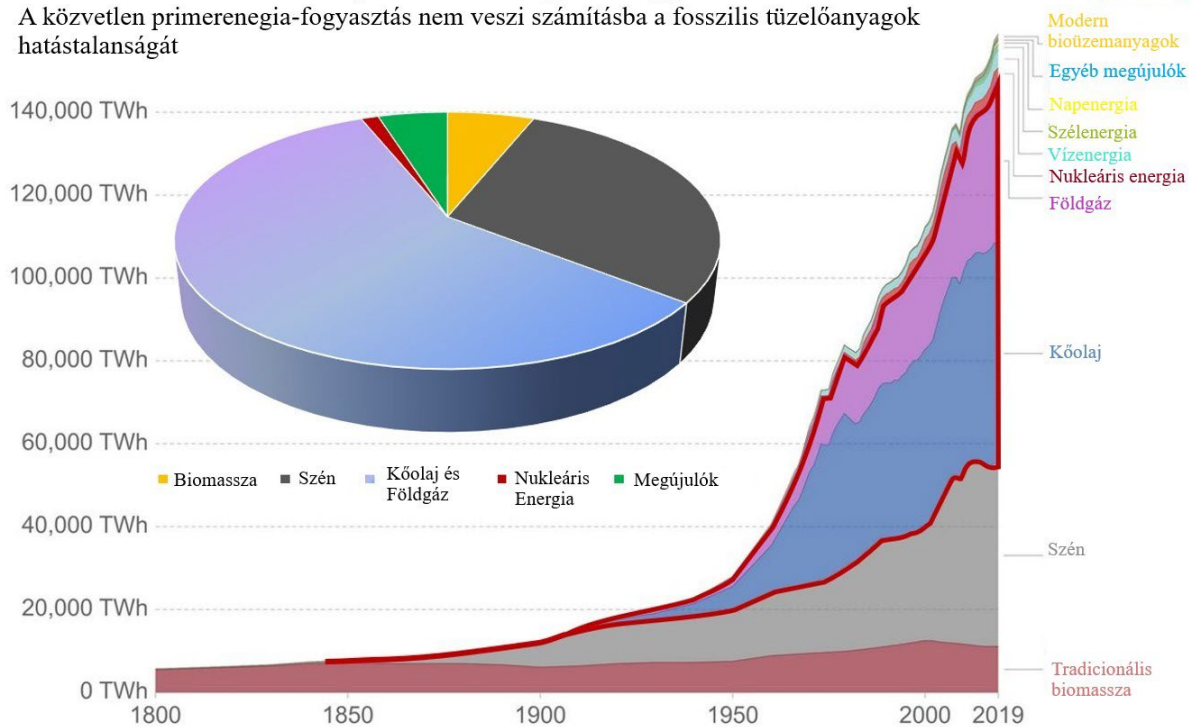
1. ábra: A globális felszíni hőmérséklet eltérése az 1850–1900-as időszak átlagától 1950–2100 között különböző forgatókönyvek alapján. Forrás: IPCC, 2021

Sajnos az eddigi trendek alapján és az emberi természetből fakadó általános hozzáállás miatt a gyökeres változás nem tűnik túl valószínűnek, az olyan eredmények ellenére sem, mint a Párizsi Megállapodás [1 – eur-lex.europa]. Az aláíró országok ugyan megállapodtak, hogy az ipari forradalom előtti átlaghőmérséklethez képest mért emelkedést 2 °C alatt szeretnék tartani, ám nem látszik, hogy komoly előrehaladást sikerült volna elérni, hiszen például az energiafogyasztás nagy része továbbra is a fosszilis tüzelőanyagokra támaszkodik (2. ábra).

Így a legjobb esély a technológiai fejlődés és annak alkalmazása a lehető legzöldebb módon. Ennek a technológiai fejlődésnek lehet egy új dimenziója a geomérnökség, tehát a Föld nagyszabású, szánt szándékkal történő befolyásolása és átalakítása. Ez kis léptékben már működik, ezt hívjuk időjárás-módosításnak. Ez a meteorológiai terület a 20. század közepén született, amikor Vincent Schaefer 1946-ban egy repülőgéppel szárazjég részecskéket permetezett egy felhőbe, ami havazást indított el az adott területen. Ennek a módszernek a fejlettebb variánsait pedig manapság is használják jégkárok elkerülése, csapadékkeltés vagy ködoszlatás céljából (Bartholy *et al.*, 2013).

Globális közvetlen primerenergia-fogyasztás

A közvetlen primerenergia-fogyasztás nem veszi számításba a fosszilis tüzelőanyagok hatástalanságát



2. ábra: Statisztikai áttekintés a világ energiapiacáról. Forrás: [2 – Our World in Data]

A következő fejezetekben az időjárás-módosítás időben és térben nagyobb skálájú alkalmazásáról, a geomérnökség két nagy csoportjáról lesz szó. A 2. fejezetben az egyes módszereket mutatjuk be, a 3. fejezetben pedig a geomérnökség hátrányairól írunk. Végezetül összefoglaljuk a dolgozatot.

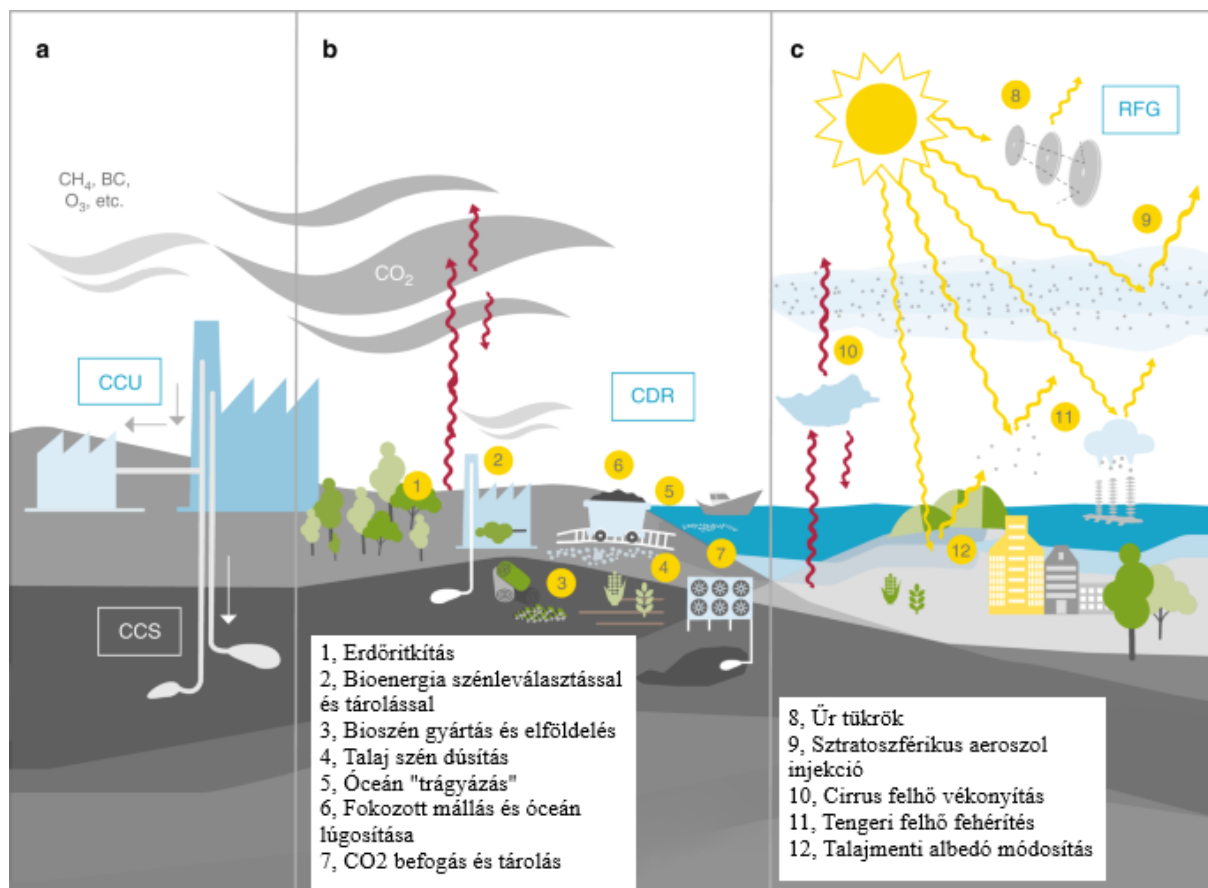
2. A globális felmelegedés mérséklésére irányuló módszerek

A geomérnökség tudományának mindennapos alkalmazásától még nagyon messze áll az emberiség, mert több gyakorlati és morális kérdést is felvet ez az új tudományos módszer. Ahhoz, hogy a témáról produktív vitát lehessen folytatni, mindenekelőtt a definícióját kell tisztázni. A geomérnökség a Föld globális, nagyszabású, szándékos, antropogén befolyásolását, a földi mechanizmusba, az éghajlati rendszerbe való beavatkozást jelenti, melynek célja a klímaváltozás elleni küzdelem, a globális felmelegedés lelassítása (*Szőke, 2018*). Röviden az éghajlat mesterséges befolyásolását értjük ezalatt. A geomérnökösödés igyekszik kezelni a globális felmelegedést kiváltó okokat és az azokból következő negatív effektusokat (például üvegházhatású gázok magas légköri koncentrációja okozta növekvő átlaghőmérséklet). Egyfajta tüneti kezelése a bolygó emberek által okozott „betegségének”.

A geomérnökség módszereit (3. ábra) két fő csoportba soroljuk. Az egyik a napsugárzás-menedzsment (SRM¹), a másik a szén-dioxid kivonására (CDR²) irányuló módszerek csoportja (*Lockley et al., 2019*). Az SRM jóval gyorsabban ható, olcsóbb, de nem teljeskörű módszerekből áll, ezzel szemben a CDR lassabb, drágább de átfogóbb technológiák csoportja. A kettő egyidejű használata hatásos kiegészítése lehet egymásnak. Az SRM gyors hatása segíthet meghosszabbítani az időt, amíg a CDR elkezdi kifejteni hatását (*Lockley et al., 2019*).

¹ SRM: Solar Radiation Management

² CDR: Carbon Dioxide Reduction



3. ábra: Összefoglaló ábra a geomérnökségi módszerek típusainak egy részéről.
Forrás: Lawrence et al., 2018

2.1. Napsugárzás-menedzsment

A napsugárzás-menedzsment, ahogyan a nevében is benne van, a Föld felszínre jutó napsugárzás mennyiségének szabályozásával befolyásolná a globális átlaghőmérséklet alakulását. Ezt a módszert további öt csoportba lehet sorolni:

- Sztratoszférikus Aeroszol Injekció (SAI)³
- Tengeri Felhő Fehérités (MCB)⁴
- Cirrus Felhő Vékonyítás (CCT)⁵
- Talajmenti Albedó Módosítás (GBAM)⁶
- Mikrobuborékok/Tengeri Hab Készítése (MB/SF)⁷

A következők alfejezetekben ezt a négy módszert ismertetjük részletesebben.

³ SAI: Stratospheric Aerosol Injection

⁴ MCB: Marine Cloud Brightening

⁵ CCT: Cirrus Cloud Thinning

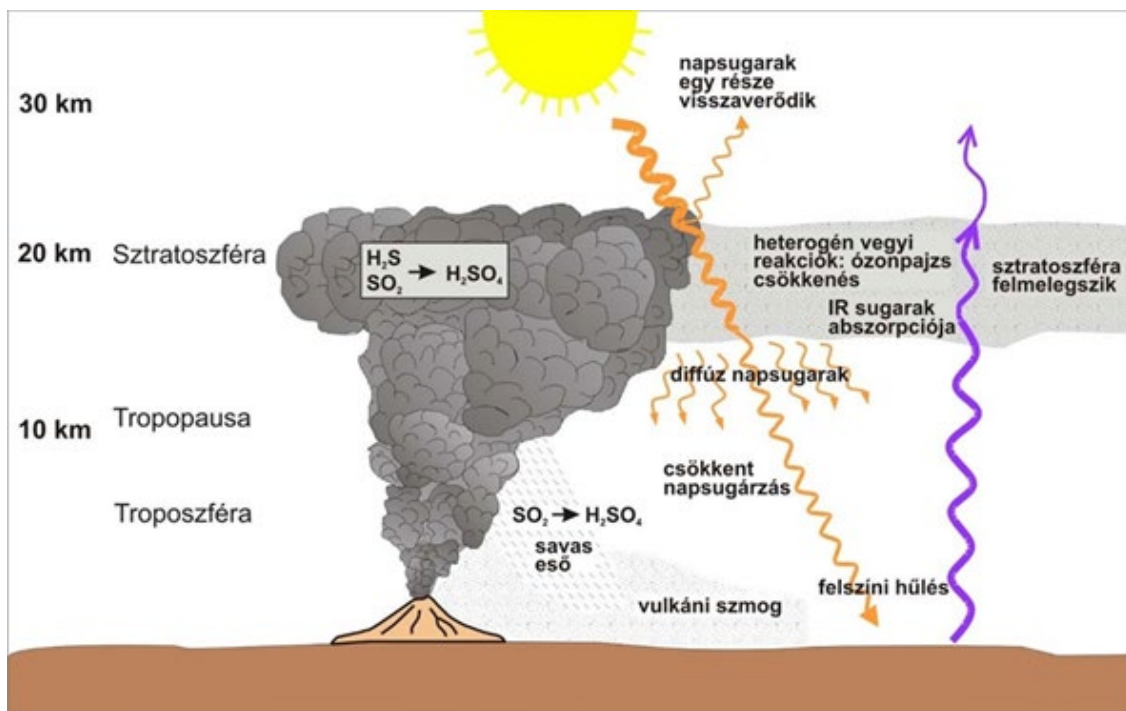
⁶ GBAM: Ground-Based Albedo Modification

⁷ MB/SF: Microbubbles/Sea Foam

2.1.1. Sztratoszférikus Aeroszol Injekció

A SAI a gázok sztratoszférába való befecskendezésével próbálja hűteni a bolygót (Reynolds, 2019). Ezek a beinjektált gázok és egyéb erre alkalmas anyagok a légkörben aeroszolként viselkednek, melyek hőmérsékletcsökkentő hatásúak. Azonban a hűtő hatásuk mellett valószínűleg befolyásolnák a légköri cirkulációt és minden bizonnyal a csapadékba is belekerülnének, amivel aztán az élő szervezetekbe juthatnak. Ez a befecskendezett anyag lehetne kén-dioxid (SO_2), amiről tudjuk, hogy működik, hisz a természet saját maga is juttat kén-dioxidot a sztratoszférába vulkánkitörések formájában (4. ábra). Az ilyesfajta természeti jelenségek alkalmával a hőmérséklet a kitörés méretétől függően valóban csökken (Summerhayes and Zalasiewicz, 2018).

Ha tehát a SAI során a befecskendezett anyag kén-dioxid lenne, akkor befolyásolná a levegő kémiai összetételét, illetve hatással lenne a felhők mikrofizikájára. Ezek alapján a folyamatot a tudomány jelenlegi álláspontja szerint, leginkább csak a vulkánok kitöréseivel lehet összehasonlítani.



4. ábra: Vulkankitörések klimatikus hatásának egyszerűsített magyarázata. Forrás: Harangi, 2017

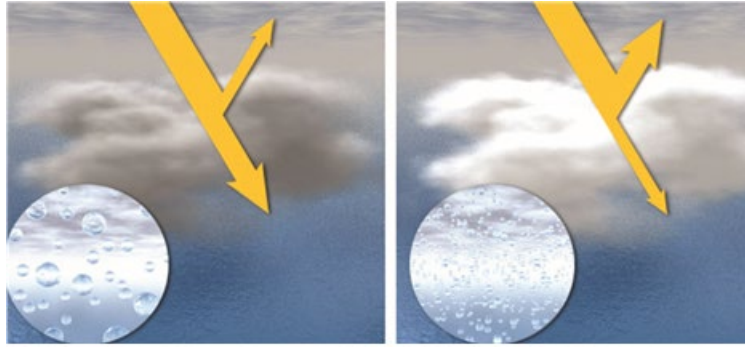
A jelenlegi elképzelések mentén a módszer folyamatos koncentráció-növeléssel valósulna meg (Smith and Wagner, 2018). Az első évben 200 000 tonna kén-dioxidot kéne befecskendezni a sztratoszférába, a másodikban 400 000 tonna lenne ez a szám, a harmadikban 600 000 tonna és így tovább. Ezt a mennyiséget a 20. század második legnagyobb

vulkánkitörésével, a fülöp-szigeteki Luzon szigetén található Pinatubo 1991-es erupciójához lehet hasonlítani, ahol hozzávetőleg 20 millió tonna kén-dioxid került a légkörbe (*Bluth et al.*, 1992) és ez globálisan is észlelhető lehűlést hozott. Érdekesség, hogy a kitörés miatt három héttel tovább tartott a tél a Hudson-öbölben, aminek következtében tovább maradt vastag a jég és ez kedvezően hatott a helyi jegesmedve populációra (*Robock*, 2003).

Ezek a számok ugyan hatalmasnak tűnhetnek és kétségtelenül van kockázata annak, ha bármiből is ennyi a légkörbe jut. Azonban évi közel 100 millió tonna kén jut a légkör alsóbb zónáiba (*Qirui et al.*, 2020), főleg az ipar kibocsátásai miatt, melynek káros hatásai sokkal nagyobbak, ilyen például a savas eső. Összehasonlítva a lehetséges következményeket, a sztratoszférában tartózkodó kén környezeti kockázata jóval kisebb, mint a troposzférában tartózkodóé. Fontos továbbá kiemelni, hogy a sztratoszférába való közvetlen emittálás csak addig történne, amíg szükségünk van a megnövelt fényvisszaverésre és nincs fenntartható megoldás a globális felmelegedés mérséklésére vonatkozóan. Nyilvánvalóan minél hamarabb elérjük a karbonsemlegességet, annál hamarabb lehet beszüntetni vagy szignifikáns mértékben csökkenteni az aeroszol injekciót, így annak a kockázata is csökkenhet, hogy ennek bármiféle tartós, negatív hatása legyen.

2.1.2. Tengeri Felhő Fehérités

Az MCB alaptézise John Latham, brit kutatótól származik, akit 1988-ban kértek fel, hogy dolgozzon a Nemzeti Légkörkutatói Központban Kolorádóban. Itt dolgozta ki Stephen Hugh Salter segítségével az MCB ötletét és lehetséges megvalósításának terveit [3 – geoengineeringmonitor]. A gondolat egy alapvető természeti jelenség, a tenger párolgásának felerősítésén alapszik. Nevéből következik, hogy a módszer célja, miszerint a tenger felett található felhőket világosabbá tegyék, így megnövelve azok albedóját. Az eljárás tehát azt eredményezi, hogy a felhők kevesebb sugárzást nyelnek el és többet vernek vissza a világűrbe, ezzel csökkentve a hőmérsékletet a felszínen. Az elmélet ezt rengeteg apró részecske, például tengeri só aeroszol fellövésével valósítaná meg. Ezek feljutnak a légkörbe és a keletkező felhők kondenzációs magjaiként viselkednének, amelyek köré gyűlnek a vízgőz molekulák. Ezek a felhők a mesterségesen megnövelt mennyiségű kis méretű aeroszolnak köszönhetően sűrűbbek és világosabbak lesznek, mint a természetes úton kialakuló társaik (5. ábra).



5. ábra: Az MCB fehérebbé teszi a felhőket a sűrűbb, de kisebb cseppek kialakításával.
 Forrás: [4 – NASA]

Latham és Salter (*Latham et al.*, 2012) a felhőkbe jutó részecskéket nagy, erre kialakított hajókból (6. ábra) tervezték fellőni, a fellövendő „lőszert” pedig helyben nyernék ki a tengerből és a hajó képes lenne azt egyből átalakítani sós vízből felhőképzésre alkalmas kondenzációs maggá. Ez biztosítaná a fenntarthatóságát a folyamatnak.



6. ábra: Egy művész elképzelése egy Flettner rotorhajóról, mely képes lehet a részecskék fellövésére.
 Forrás: Latham et al., 2012

Az eljárás első kísérlete 2011-ben történt Kaliforniában, a kísérlet neve a „Csendes-óceán keleti részén kibocsátott aeroszol felhő kísérlet”⁸ (*Russel et al.*, 2012). A kutatást az amerikai

⁸ E-PEACE: Eastern Pacific Emitted Aerosol Cloud Experiment

Nemzeti Tudományos Alap (U.S. National Science Foundation) támogatta és a kaliforniai San Diego Egyetem vezette. A kísérlet 12 napig tartott, ezidő alatt pedig folyamatosan sót szórtak repülőgépekből, valamint füstöt és kipufogógázt emittáltak konténerhajókból. Ezt követően egy repülőgéppel gyűjtötték be az adatokat az aeroszol-felhő kölcsönhatásokról.

A következő hasonló kísérletet 2020 márciusában hajtották végre Ausztráliában (*Tollefson, 2021*). A projekt elméletileg a Nagy Korallzátony védelmére irányuló módszerek egyik lehetséges fajtájának bemutatására szolgált volna, azonban a legnagyobb problémát az ökológiai szisztémára vélhetően nem az emelkedő hőmérséklet jelenti, hanem az óceán savasodása és a nagymértékű szennyezés a part menti területeken, de erre a problémára az MCB nem képes megoldást nyújtani. A teszt jelen esetben rövidebb volt, mint a 2011-es próba során, összesen négy napig tartott. Ezt a kutatást a Southern Cross Egyetem és a Sydney-i Tengerészeti Intézmény vezette a korallzátony déli részén, az ausztrál Zátony és Helyreállítási és Alkalmazkodási Program (RRAP⁹) program keretein belül [3 – geoengineeringmonitor]. A tesztelt prototípus gép egy filteren keresztül pumpálta a tengervizet és egy szórófej segítségével lőtte fel a levegőbe a létrehozott kis cseppeket. Ezeket a cseppeket nagy teljesítményű propellerekkel emelték a magasba. A tervek szerint a kísérletet egy nagyjából 400 km²-es területen akarták elvégezni, de ez ellen majdnem 200 környezetvédelmi csoport tiltakozott. Ennek ellenére a kísérletet mégis engedélyezték a már említett korallzátony-védelmi törekvések miatt. A kutatás támogatói közt van az ausztrál székhelyű BHP group¹⁰ is, amely fő profilja a különböző ásványi kincsek bányászata, valamint a légi közlekedés és Ausztrália egyik legnagyobb üvegházhatású gáz kibocsátójának számít. Minden bizonnyal a vállalatcsoport a környezetvédelmi kutatást azért támogatja, hogy a geomérnökség lehetőséget adjon a környezetvédelmi célok kitolásához és így tovább tudnának működni jelentősebb szén-dioxid (CO₂) kibocsátás csökkentés nélkül. Ugyanakkor ez a felfogás nem segíti elő a klímaváltozás elleni küzdelmet, hiszen a geomérnökösödés nem jelent végső megoldást és nem fenntartható hosszútávon.

Az MCB végső soron, pár kutatástól eltekintve, még mindig csak egy elméleti koncepció, főként a modellekből van információ a működéséről. Egy nap, ha megfelelő pénzügyi és társadalmi támogatottsága lesz, akkor talán ez lehet a fő SRM módszer, amivel kezeljük a globális felmelegedést.

⁹ RRAP: Reef Restoration and Adaptation Program; Zátony Helyreállítási és Alkalmazkodási Program

¹⁰ BHP Group: Broken Hill Property Group

2.1.3. Cirrus Felhő Vékonyítás

A cirrus egy magas szintű, 5000 méter felett képződő, jégkristályokból álló felhő, aminek a hőmérséklete $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli. A bennük fellelhető jégkristályok igen aprók és ritkán helyezkednek el, a felhő szerkezete rostos, fonalas (*Bartholy et al.*, 2013). Geomérnökségi szempontból a legfontosabb tulajdonságuk azonban az, hogy erőteljesebben verik vissza az infravörös fényt, mint a Nap sugarait. Ez ahhoz vezet, hogy összességében nem hűtik a Föld felszínét, mint a többi felhő, hanem épp ellenkezőleg, melegítik. Ez az a szempont, ami miatt a módszer hívei úgy vélik, hogy el kell tüntetni vagy legalábbis vékonyítani kell az ilyen típusú felhőket, hogy több hőt tudjon veszíteni a bolygó.

A módszer hasonló lenne a MCB-hez és a SAI-hoz, vagyis jelen esetben is aeroszolókat juttatnának a légkörbe, pontosabban a troposzféra azon részeire, ahol cirrus alakul ki. Az aeroszol megnövekedett mennyisége nagyobb, de kevesebb jégkristályt eredményezne, aminek következtében rövidebb lenne a felhő élettartama és csökkenne az optikai mélysége. Mindez ahhoz vezetne, hogy több hosszúhullámú sugárzás tudna kijutni a világűrbe, ez pedig lehűlést eredményezne. A folyamat viszont fordítva is elsülhet. A mesterségesen vékonyított felhők tovább életben maradhatnak és így még több hőt benntartanak a Föld légkörében (*Storelvmo et al.*, 2013). További aggály a módszerrel kapcsolatosan, hogy amint az előző módszerek, ez is befolyásolhatja a csapadékképződést és ezzel együtt az esőzések intenzitását, gyakoriságát és térbeli eloszlását, de ez még teljes mértékben csak elméleti akadály, ugyanis a módszer a SAI-hoz és az MCB-hez képest új és még nem történtek valódi tesztek (*Kristjánsson et al.*, 2015). Eddig a CCT kutatása kizárólag az elméleti tanulmányozásra és a cirrus felhők vizsgálataira és megfigyeléseire korlátozódott.

2006-ban, az Egyesült Államokbeli Sivatagi Kutatóintézet (DRI)¹¹ elindított egy 5 éves projektidőszakot [5 – geoengineeringmonitor]. Ebben az időszakban vizsgálták a kisméretű jégkristályok koncentrációját, valamint a természetes és antropogén eredetű aeroszolok arányait a felhőn belül. Ezekkel az adatokkal pontosabb globális klímamodelleket lehet alkotni és jobban megérthetjük a pehelyfelhők működését. A megfigyelés alatt szerzett információkkal a Geomérnökségi Modell Elemző Projekt (GeoMIP)¹² és a Zürichi Szövetségi Műszaki Intézet (ETH Zurich)¹³ elkezdett dolgozni és szimulációkat futtatni, hogy egy esetleges nagyfokú CCT milyen eredményt hozhatna a klímaváltozás lelassításában. A GeoMIP egy nemzetközi kollaboráció klímamodellező központok között. Ezek a központok olyan fejlett országokban

¹¹ DRI: Desert Research Institute

¹² GeoMIP: Geoengineering Model Intercomparison Project

¹³ ETH Zurich: Eidgenössische Technische Hochschule Zurich

találhatóak, mint Németország, Dánia, Kína, Kanada, Norvégia, Japán, az Egyesült Királyság és nem utolsósorban az Egyesült Államok. Ez is azt jelzi, hogy a fejlett országok keresik a lehetőséget, hogy minél később kelljen átállni a teljesen CO₂ semleges életre. Az általuk elkészített modellek a Cirrus felhők vastagítását is számításba vették, ami akkor alakulhat ki, ha túladagolják a felhőkbe az aeroszoloikat és az ellentétesen a kívánt hatással, nem csökkenti, hanem növeli az élettartamot és még optikailag is kevésbé lesznek áteresztőek. Ez azt jelenti, hogy a CCT, mint geomérnöki megoldás, elég kockázatos, mert ha rossz a kivitelezése, akkor a globális felmelegedésnek akár egy erősítő mechanizmusa is lehet.

2.1.4. Talajmenti Albedó Módosítás

A talajmenti albedó módosítás egy olyan SRM módszer, amely azáltal kívánja lassítani a globális felmelegedés problémáját, hogy a Föld albedóját megnövelné. Az albedó egy latin szó, mely fehérséget jelent. Fizikai definíciója a tárgy által visszavert és a tárgyra érkező sugárzás hányadosa (*Bartholy et al., 2013*). Ennek fokozásának több fajtája létezik. A legkörnyezetbarátabb és a leginkább elfogadott javaslat a természetesen magas albedóval rendelkező növények termesztése (*Morton, 2009*). Ez a megoldás nem csak magát a beérkező napsugárzást módosítaná, hanem részleges megoldást nyújtana a növekvő CO₂ koncentrációra is, hiszen a növények, amelyeket a geomérnökségi program részeként telepítenek, széndioxidot nyelnek el. Ezzel ellentétes ötlet a boreális erdők megritkítása vagy kiirtása, amely ugyan növelné az összefüggő hófödte területek nagyságát, azonban a fák kivágása károsíthatja a helyi ökoszisztémákat és a CO₂ elnyelését csökkentené (*Lee et al., 2011*). Hasonló opcióként vetődtek még fel olyan ötletek, mint a nagy sivatagi vagy jeges területek fényvisszaverő anyagokkal való borítása, vagy a hegycsúcsok és háztetők fehér festéssel való borítása. Mindezt azért, hogy a felszínen található tereptárgyak minél hatékonyabban verjék vissza a beérkező rövidhullámú sugárzást, így kevésbé tudják a saját kibocsátott hosszuhullámú sugárzásokkal melegíteni saját környezetüket.

A GBAM-en belül a jégfedés egy olyan eljárás, mely egy vékony, fényvisszaverő anyagot vinne fel a jégtakaró felszínére, egy úgynevezett „visszaverő szalagot” [6 – geoengineeringmonitor]. Ez az extra réteg, amellyel, hogy nyilvánvalóan magas albedóval rendelkezne, szigetelő réteggé válhatna a gleccsereknek és jégsapkáknak, ami lassíthatná az olvadásukat. A módszert az Egyesült Államokban és Kanadában nagyobb tavak felszínén már tesztelik olyan helyszíneken, mint az alaszakai North Meadow Lake (*Field et al., 2018*). A kísérlet egy 17500 km²-es területen, 2015 telén kezdődött meg. A szerzett tapasztalatok alapján arra a megállapításra jutottak, hogy szeles, kültéri körülmények közt jobb olyan anyagot

használni, amely nedvesíthető, mert az hatékonyabban tapad a felszínhez. Továbbá kísérleteztek különböző szemcsés fényvisszaverő anyagok kézi telepítésével kisebb területeken és mezőgazdasági gépekkel való szórással nagyobb területen. A helyi lakosok, akiknek a beleegyezésük nélkül végzik a kísérletet, attól tartanak, hogy a szilícium-dioxid por, ami a fedőanyagban fellelhető, hosszútávon káros hatással lesz a helyi lakosok egészségére, valamint negatív hatást fog okozni a helyi ökoszisztémában, beleértve a vándorló madarak populációit is. Egy másik jégfedési ötletet még 2009-ben vetettek fel, amelyet az Alpok síterületei ihlettek, ahol a profit védelmének érdekében a hegyoldalakat lefedik egy takaróréteggel, így megvédve a leesett hóréteget az olvadástól. Sajnos a takaróréteg polipropilén lenne, ami azt jelenti, hogy a művelet költséges lenne és hozzájárulna a légköri CO₂ további növekedéséhez az előállítási módszere miatt. A többi műanyaghoz hasonlóan a polipropilént is kőolajból állítják elő és 1 km²-nyi gleccserjég lefedésének becsült költsége 4,6 millió amerikai dollár (átszámolva jelenlegi árfolyamon ez nagyjából 1,5 milliárd magyar forintnak felel meg), ráadásul ez a becsült érték nem tartalmazza a műanyag későbbi újrahasznosításának költségeit.

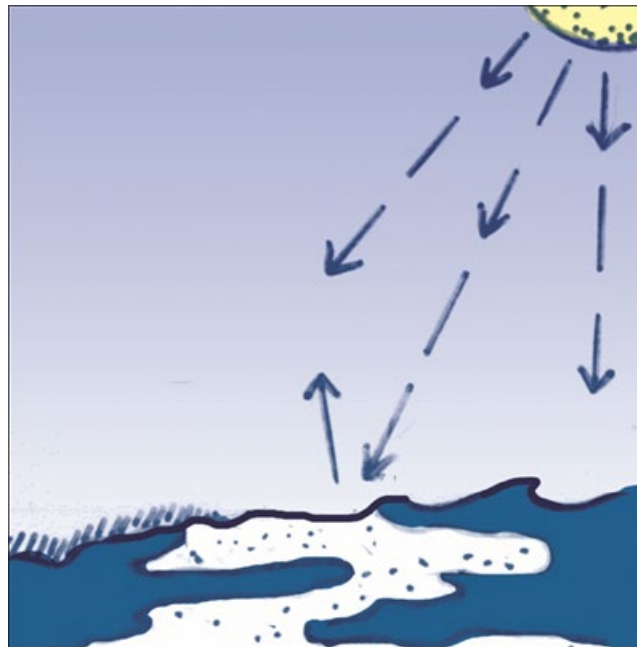
Nagyon hasonló módszer a felszín albedójának növelésére a gleccser takarás. Ebben az esetben nem egy speciális takaróréteget visznek fel a felületre, hanem műhóvizet szórnak rá turbinák segítségével. A Potsdami Éghajlatváltozási Intézet (PIK)¹⁴ tanulmányai alapján a gleccser takarási geomérnökségi technika az albedó növelése mellett a tengerszint emelkedését is képes lenne lelassítani azzal, hogy a nyugat-antarktisi területen két nagyobb gleccserre mesterséges hóvizet juttatnának (*Feldmann et al.*, 2019). Az intézet modellezése alapján ilyen nagy mennyiségű víz felemeléséhez, sótalánításához és szétterítéséhez szükséges energia előállításához több mint 12000 szélturbina által termelt energia lenne elégséges. A nagy mennyiségű mesterséges hóhoz szükséges vizet az Antarktist körülölelő óceánból nyernék, melyet egy sótalánítási folyamat után juttatnának a gleccserre. Az eljárás mód kockázata, hogy a víz kinyerése pusztító hatással lehet a környező, érzékeny ökológiai egyensúlyra.

2.1.5. Mikrobuborékok/Tengeri Hab készítése

Ez az SRM módszer a nagy, egybefüggő vízfelületek fényvisszaverő képességének növelésével célozza meg lelassítani a klímaváltozást. Az elmélet azon alapszik, hogyha az óceánokba, tengerekbe sok milliónyi levegőbuborékot juttatunk vagy egy speciális tengeri hab réteget, akkor megnöveljük annak albedóját, ami több visszavert sugárzást jelent és kevesebb felvett energiát (*Seitz*, 2011; 7. ábra). Így csökkenne az óceánok átlaghőmérséklete és ezáltal a

¹⁴ PIK: Potsdam Institute for Climate Change

légkör hőmérséklete is. A buborékoknak nem csak a mennyisége, hanem azok vízfelszínén eltöltött ideje is fontos tényező (Crook *et al.*, 2016), ugyanis minél tovább képesek megmaradni, annál több energiát képesek visszaverni a világűr felé. A buborékok mennyiségének és élethosszának növelésére két lépést ötvöznének. Az első az, hogy a lehető legtöbb mikrobuborékot állítanának elő speciálisan erre a feladatra kifejlesztett hajókkal, amik fel lennének szerelve vagy egy buborékfújó rendszerrel, vagy egy mechanikus rázógéppel. Ezek után a létrejött mesterséges buborékokhoz felületaktív anyagokat adnának, amik az élettartamnövelésért felelősek jelen esetben. A másik megoldás a mesterséges tengeri hab, amely specifikus habosítószer hatására jönne létre, ilyen anyagok lehetnek például különböző zselésítőszer. Ezek az anyagok hasonló mikrobuborékokat hoznának létre, mint a mechanikai rázás vagy a fúvókák [7 – geoengineeringmonitor].



7. ábra: A mikrobuborék technológia során úgy növeljük a felszín albedóját, hogy buborékformáló vegyi anyagokat adagolunk a tengerbe. Forrás: [7 – geoengineeringmonitor]

A módszer legnagyobb veszélye az előnyéből származik, ami a tenger lefedése. Ha a tengert lefedjük, az negatív hatással lehet a táplálékláncre, mivel csökkenti a vízbe érkező sugárzást, ami a fitoplanktonok fotoszintézisének aktivitásának csökkenéséhez vezet, ez pedig csökkenti a víz oxigénszintjét. Ezen felül a felszín elzárása a levegőtől gátolja a gázcserét, ami további oxigénszint csökkenéshez vezethet, ez pedig nyilvánvalóan végzetes következménnyel járhat a tengeri élővilág tagjaira. Ráadásul az alkalmazott kemikáliák miatt fennállhat a tengeri

élőlények megmérgezésének veszélye is. Az óceánok ökoszisztémáinak felbomlása pedig beláthatatlan következményekkel járna az egész bolygóra nézve.

2.2. A szén-dioxid kivonására irányuló módszerek

A szén-dioxid kivonására irányuló módszerek a geomérnökség másik nagy csoportja a napsugárzás menedzsment mellett. Az ilyen eljárások az üvegházhatású CO₂ légkörből való eltávolításával próbálják elkerülni a globális klímakatasztrófát. Jellemzően drágábbak és lassabbak, mint az SRM metódusai. Ugyanakkor, ha találnánk egy olyan megoldást, amellyel képes lenne ugyanannyi CO₂-t elnyelni, mint amennyit előállít és ez még fenntartható módon megvalósítható is lenne, az nagyban segíthetné az emberiség és más fajok túlélését a Földön. Ezeket a negatív emissziós technológiákat az IPCC Helyzetértékelő Jelentéseihez felhasznált modellek egy része is számításba veszi bizonyos scenáriók esetén, mint egy, a 2 °C-os határ elérése elleni eszközt (*Richter et al.*, 2019). Ezeket a módszereket is több csoportra lehet különíteni:

- Szén-leválasztás és -Tárolás (CCS)¹⁵
- Közvetlen Légbefogás (DAC)¹⁶
- Óceán „trágyázás” (OF)¹⁷
- Fokozott Mállás (EW)¹⁸
- Fokozott Fotoszintézis (EP)¹⁹
- Mesterséges Felemelés (AU)²⁰

2.2.1. Szén-leválasztás és Tárolás

Ennek a CDR módszernek a különlegessége, hogy először az olajipar kezdte el használni és az olajipar is fejlesztette. Először nem is a klímaváltozás mérséklése volt a cél és nem is ez volt az eljárás neve, hanem Fokozott Olajvisszanyerés (EOR)²¹. Az eljárás módja lényege az volt, hogy a lehető legtöbb maradék olajat kinyerjék a lelőhelyből és ennek eléréshez nyomás alatt lévő CO₂-t pumpáltak az olajtározókba [8 – geoengineeringmonitor]. Így képesek voltak a megmaradt, lerakódott kőolajat is kinyerni és jelentősen megnövelni a kitermelt mennyiséget.

¹⁵ CCS: Carbon Capture and Storage

¹⁶ DAC: Direct Air Capture

¹⁷ OF: Ocean Fertilization

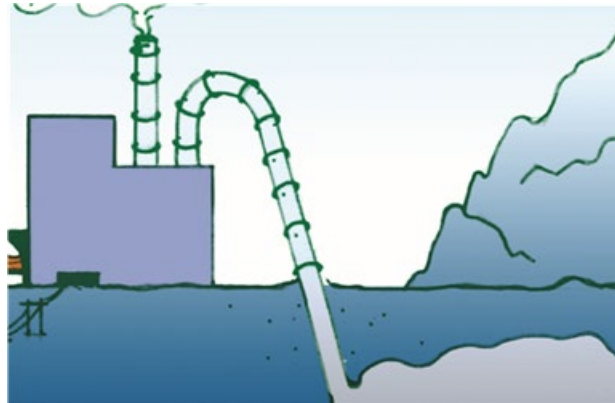
¹⁸ EW: Enhanced Weathering

¹⁹ EP: Enhanced Photosynthesis

²⁰ AU: Artificial Upwelling

²¹ EOR: Enhanced Oil Recovery

Ebből kifolyólag a technológiai folyamat már elérhető és alkalmazható, azonban nem terjedt el költségessége miatt. Mióta a folyamatra egy lehetséges CDR technikaként tekintenek, a neve CCS-re lett változtatva és főleg a cement- és acélgyártás, a finomítás és egyéb ipari folyamatok során keletkezett CO₂ megkötésére és föld alá temetésére használják. A folyamat során a befogott CO₂-t folyékony halmazállapotúvá sűrítik, majd egy vezetéken eljuttatják azokra a helyekre, amelyek alkalmasak lehetnek a hosszútávú tárolásra (8. ábra).



8. ábra: A CCS technológia megpróbálja megkötni a szén-dioxidot és eltárolni azt a felszín alatt.
Forrás: [8 – geoengineeringmonitor]

A CCS tovább bontható még két kisebb egységre:

- Szénleválasztás Felhasználása és Tárolása (CCUS)²²
- Bioenergia Szénleválasztással és Tárolással (BECCS)²³

A CCUS akár az iparból, akár a léghőből befogott CO₂-ot termékek gyártási alapanyagaként kívánja felhasználni, így az üvegházhatású gáz emberi használatra alkalmas termékek formájában lenne tárolva. Ilyen termékek lehetnek akár a vegyszerek különböző típusai vagy a bioüzemanyagok (Thakura et al., 2018). A CO₂ alapanyagként való felhasználásával hosszútávon olcsóbb vagy tisztább folyamatot érhetünk el végeredményként, mint a hagyományos szénhidrogének esetén. Tágabb értelemben ide tartozhat a fák telepítése, majd azok építőanyagként való felhasználása, hiszen a növények fotoszintézissel CO₂-t vonnak ki a léghőből és miután ezek a növények beépítik a saját szervezetükbe, utána hasznosításra kész a megkötött CO₂ (Hepburn et al., 2019).

A BECCS bioenergia kinyerése miatt történő égés utáni CO₂ visszanyerést takar. A BECCS-hez fát, elhalt növényeket vagy trágyát kell elégetni, majd az égésből keletkezett CO₂-t az égés után a lehető legenergiatakarékosabb utóégés-leválasztással visszanyerik (Schneider, 2019).

²² CCUS: Carbon Capture Use and Storage

²³ BECCS: Bioenergy with Carbon Capture and Storage

Elméletben a kifejezetten a BECCS technológia céljából ültetett fák égetése lenne optimális. Ezek elnyelik a légköri CO₂-t fotoszintézis útján, majd miután kivágják és elégetik őket energianyerés céljából, a keletkező CO₂-t újra elnyelik, ezért ez a folyamat „szén-semlegesnek” tekinthető, amennyiben 100%-os hatásfokkal képes elnyelni a keletkező CO₂-t. Majd ezek után, ha a folyamat további része CCS folyamatként zajlik, akkor a kinyert üvegházhatású gázt elszállítják egy erre kialakított helyre és ott eltárolják (például a föld alatt). Ha CCUS módszerekkel folytatják a folyamatot, akkor viszont iparcikkekben fogják tárolni a keletkezett égési mellékterméket.

A BECCS módszer hátulütője, hogy nagyon víz- és műtrágyaigényes megoldás (*Burns and Nicholson, 2017*). Ha a BECCS-t éghajlati szempontból jelentős mértékben, gigatonnás méretekben szeretnék hasznosítani, abban az esetben hatalmas mezőgazdasági területeket, erdőket és más, a természethez tartozó területeket kéne a biomassza-ültetvények rendelkezésére bocsátani. Feltételezések szerint ez a területigény elérheti az 1 milliárd hektárt is (*Field et al., 2017*). Ekkora terület elzárása kizárólag egy cél érdekében megnövelné a maradék területért való versengést és a termékek piaci árának ugrásszerű emelkedését okozná. Ráadásul a biodiverzitás csökkenéséhez is vezetne, hiszen monokultúrák létesülnének a természetes ökoszisztémák helyén (*Schneider, 2019*). Emellett az elzárt területeken élő őslakosok és ott élők jogai is sérülhetnek, széleskörű privatizáció és földfoglalás kezdődhet és az érintett közösségek politikai elnyomás áldozatai lehetnek (*Kartha and Dooley, 2016*).

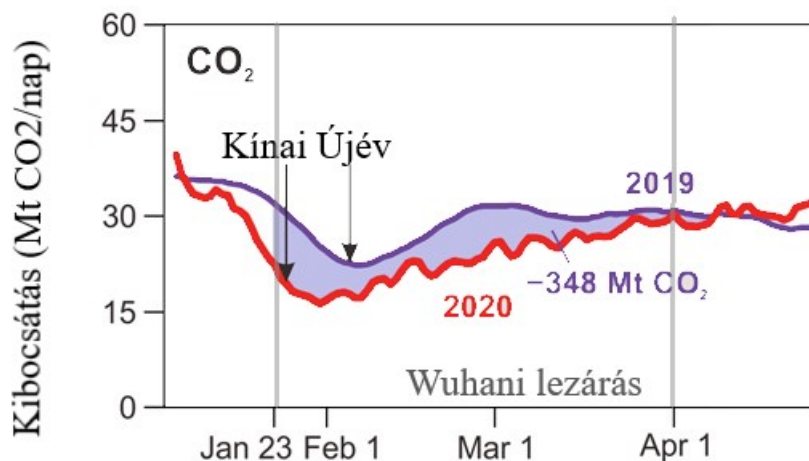
2.2.2. Közvetlen Légbefogás

A Közvetlen Légbefogás egy olyan technológiai innováció, mely kémiai reakciók során kívánja kivonni a CO₂-t a légkörből (*Socolow et al., 2011*). Ez a fogalom egy összefoglaló név és több megoldási típust tartalmaz. Az összes DAC módozat előnye, hogy földrajzi helytől függetlenül hatékonyan lehet használni, mert a légköri gázok eloszlása nagyjából egyenletes a bolygón mindenhol (tartózkodási időtől függően), így a szén-dioxidé is, jelenleg 417 ppm környékén van ez az érték [9 – NASA]. Kanadában a Carbon Engineering (CE)²⁴ folyékony alkálifém-oxidokat használ szorbensként és ez köti meg a levegőben lévő CO₂-t. A vállalat földgázt használ a járműveinek meghajtására és a technológiájuk az elégetett gázból származó károsanyagot is leköti (*Keith et al., 2018*). Ahhoz, hogy a módszer a valóságban éghajlati szempontból relevánsá váljon, gyorsan kell fejleszteni és gigatonnás léptékben működtetni. Hasonló vállalat az Egyesült Államokbeli Global Thermostat (GT). A GT a CE-től eltérően

²⁴ CE: Kanadai székhelyű tiszta energiával foglalkozó vállalat, fő irányvonala a DAC

nem folyékony, hanem szilárd halmazállapotú amin alapú megkötőanyagot használ (Ping et al., 2018). De a legtöbb szimulációban még a technológiai fejlődést beleszámolva is csak kiegészítésként gondolnak a DAC-ra, nem elég arra, hogy önmagában elég legyen a klímaváltozás megállítására.

Az Amerikai Fizikus Társaság (APS)²⁵ becslései szerint a DAC egy relatíve költséges vállalkozás. A társaság optimista becslésekkel számolva 600 USD/tonna kivont CO₂ árra következtet jelenleg (Socolow et al., 2011). Kínában naponta átlagosan nagyjából 30 Mt CO₂-t bocsátanak ki (9. ábra). 2020-ban Kína lakossága nagyjából 1,4 milliárd fő volt. Ez azt jelenti, hogy egy lakosra nagyjából évi 8 tonna kibocsátott CO₂ jut. Ami éves szinten a DAC költségeivel számolva egy kínai lakos átlagos kibocsátását nézve 4800 USD-t jelent, átváltva ez több mint másfél millió forint egy emberre évente. Még ha a kibocsátások nem is ugrottak volna vissza a koronavírus járvány előtti szintre, ez az összeg akkor is nagyjából fele ekkora lenne, ami szintén nem elhanyagolható összeg egy ember kibocsátásait tekintve.



9. ábra: Kína CO₂ kibocsátási adatai 2019 és 2020 január és április közti időszakában.
Forrás: Zheng et al., 2020

2.2.3. Óceán „Trágyázás”

Az Óceán „Trágyázás” egy olyan CDR stratégia, amely mikro- és/vagy makroelemek óceánba juttatásával próbálja segíteni a klímaváltozás elleni küzdelmet. Ezen anyagok óceáni területre való juttatása elősegítené a fitoplanktonok szaporodását, melyek a fotoszintézis révén képesek csökkenteni a légköri CO₂ koncentrációját és szerves anyagot készíteni belőle. A hipotézis szerint az eljárás előnye, hogy a fitoplanktonok elpusztulásával az eltárolt szén nem bomlana le és kerülne vissza közvetlenül a légköri körforgásba, hanem az óceán mélyére

²⁵ APS: American Physical Society

süllyedne és eltárolódna (*Schneider, 2019*). A probléma az eljárással, hogy hasonló kimenetelt okozhat az óceán azon területein, ahol alkalmazzák, mint a vízvirágzás. A vízvirágzás, másnéven eutrofizáció során a szerves anyag mennyisége megnő a vízben és ez a cianobaktériumok elterjedéséhez vezet a vízfelszínen. Ugyan ezek a baktériumok a fitoplanktonokhoz hasonlóan fotoszintézissel megkötik a CO₂-t és O₂-t termelnek, de a vízfelszín alatt kevesebb lesz a beérkező napfény mennyisége és ez csökkenti a vízben lévő növények számát, ami a víz oxigénszintjének csökkenését eredményezi, ez pedig a helyi ökoszisztémát károsítja, akár tömeges kihalást elindítva a kísérleti helyszínen (*Pálffy, 2013*).

További probléma a rendszerrel, hogy a planktonok nagy része nem jut el az óceán fenekéig és nem telepedik le üledékként (*Robinson et al., 2014*), mert jelentős része a táplálékláncba kerül. Ez szintén a helyi ökoszisztéma szerkezetének és összetételének felborulását idézheti elő. A mérgező algavirágzás szintén nem kívánt mellékhatása lehet az OF-nek (*Schneider, 2019*). Mindezen negatív hatások veszélyeztetik az élővilágot és emiatt a part menti közösségek és a halászok megélhetését, akik az érintetlen tengeri ökoszisztémától függenek.

2.2.4. Fokozott mállás

A kőzetek kémiai mállása átlagosan 1,1 Gt CO₂-t von ki a légkörből évente, ez a mennyiség főleg bikarbonát formájában raktározódik az óceán mélyén (*Streffer et al., 2018*). Ha sikerülne ezt az alapvetően lassú természetes folyamatot szignifikánsan felgyorsítanunk, az közelebb juttathatna minket egy lépéssel akár a Párizsi Megállapodásban lefektetett kibocsátás-csökkentés eléréséhez. Az EW geomérnöki módszer ezt a célt próbálja meg elérni nagy mennyiségű finomra őrölt kőzet hatalmas felületre való szétszórásával. A porrá zúzott kőzeteket kiterjedt szárazföldekre, tengerpartokra vagy a tenger felszínére szórják. Ezzel a szilikát- és karbonátkőzetek természetes mállási folyamatait szeretnék lemásolni és felgyorsítani. Az ehhez szükséges kőzeteket bányászattal és a kőzetek összezúzásával lehetne kinyerni. Ez a folyamat azonban valószínűsíthetőleg szintén CO₂ kibocsátással járna és még efelett el is kell szállítani a végterméket. Továbbá a bányászat sűrűn együtt jár a szegény térségek kihasználásával, a környezeti károkkal, valamint magas víz- és energiafogyasztással. Az eljárás természetéből fakadóan a leghatásosabban meleg, párás éghajlattal bíró területen lehetne a leghatékonyabban alkalmazni, olyan országokban, mint Brazília, India, Kína vagy Indonézia.

Vannak olyan módosítási javaslatok, melyek a bányászatot félig megkerülve bányamaradékot vagy épp a vas- és acélgyártásból származó maradék kőzeteket használnák fel. Ennek az ötletnek az előnye, hogy nem kell külön a termelést is beiktatni, ezzel olcsóbbá tehető az EW. Ilyen felhasználható melléktermék lehetne az acélsalak vagy a cementpor. Azonban ennek a

javaslatnak a hátránya, hogy az ipari melléktermékek a környezetre veszélyes vegyi anyagokat bocsáthatnak ki magukból, melyek károsíthatják a talajt vagy a vizeket ahová elhintik őket.

A technológia szárazföldi használatánál a mezőgazdasági területen való elosztatást ajánlják. Ennek az volna az előnye, hogy a kőliszt alapvetően is használatban van műtrágyaként és a talajszerkezeti hiányosságok pótlására is használják. A tengeri közegben való fokozott mállási technikát másnéven óceáni lúgosság-javításnak (OAE)²⁶ is nevezik. Ebben az esetben a tengerparton szórják szét a kiválasztott ásványokat, melyek növelik az óceánok, tengerek lúgosságát, ezáltal fokozva azok CO₂ felvevő képességét. Az OAE tengeri ökoszisztémákra és biokémiai folyamatokra gyakorolt hatása eddig ismeretlen [10 – geoengineeringmonitor].

2.2.5. Fokozott Fotoszintézis

A fejlesztett fotoszintézis a növények olyan irányú genetikai módosításán alapul, mellyel az adott növények még hatékonyabban lesznek képesek fotoszintetizálni és ezzel több CO₂-t tudnak kivonni a légkörből és eltárolni. A projekt középpontjában olyan növények állnak, mint a búza, a rizs, a gyapot és a fák nagy része. Az elképzelés kritikussai úgy vélik, hogy a laboratóriumban létrehozott GMO növények káros hatással lehetnek azok fogyasztóira és az esetleges elszabadulásuk károsan hathat az érintett ökoszisztémákra. Mindez pedig veszélyezteti az élelmezésbiztonságot.

A módszer támogatói szintén az élelmezésbiztonsággal érvelnek, csak az ötlet mellett. A Föld lakossága folyamatosan nő, 2045 és 2050 közt megközelíthetjük a 9 milliárdos lélekszámot (*O'Sullivan, 2020*). Az élelmezés sok régióban már ma is problémákat okoz, a továbbiakban folytatódó népességnövekedés pedig csak fokozni fogja ezeket a gondokat. Ugyan az élelemhiány főként nem a termelési hiányból adódik, hanem az élelemhez való hozzáférés nincs megoldva a lakosság jelentős hányadánál és a népességnövekedés főleg ezekre az elmaradott területekre jellemző (*Long et al., 2015*). A bolygó azon részein, ahol a táplálékhoz jutás nem okoz gondot viszont terménytöbblet tapasztalható, így ezekben a régiókban az éhínség, mint probléma távolinak tűnik az embereknek. Azonban, ha a GMO segítségével nem csak a fotoszintézis mértékét sikerülne megoldani, hanem a termés hozamot és a növények belső tápértékét is sikeresen növelnék, azzal nagy előrelépést érnének el az általános jólét felé.

A Fokozott Fotoszintézis egy fontos kutatása a 2008-ban indult C₄ Rizs Projekt (*Ermakova et al., 2019*). A nemzetközi program lényege, hogy az eddig C₃ fotoszintézis típussal rendelkező rizsfajtákat C₄-es szintre emeljék, ezzel megnövelve a termés hozamot. Emellett még kitűzött

²⁶ OAE: Ocean Alkalinity Enhancement

cél a hatékonyabb nitrogén- és vízfelhasználás, valamint a meleggel és szárazsággal szemben az ellenállóképeség fejlesztése. A folyamat már ott tart, hogy sikeresen juttattak be olyan enzimeket, melyek bizonyos vízi egysejtűekben a C₄-es fotoszintézisért felelnek. Bár ez még konkrét fotoszintetikus növekedést nem eredményezett, de segített jobban megérteni a rizsben lévő C₄-gének szabályozását, mely információk hasznosak lehetnek a továbbiakban a projekt fejlődésének szempontjából (Miyao *et al.*, 2011).

2.2.6. Mesterséges Felemelés

A mesterséges felemelés olyan CDR stratégia, mely az óceán rétegeinek forgatásán alapszik. A cél, hogy a mélyen lévő, hidegebb, tápanyagban gazdag mélyóceáni vizeket a felszínre hozzák. Elméletileg ezzel a felszínen elő tudnák idézni a fitoplanktonok számának serkentését, mely fokozott O₂ termelést jelentene és ezzel együtt fokozott CO₂ elnyelést is. Az elmélet szerint, ahogyan az OF során is, a megnövekedett fitoplankton tömeg több CO₂-t tárolna el és ellenben egy szárazföldi növényvel, az elbomlás során nem pumpálná vissza a légkörbe a megkötött szenet, hanem az óceán mélyére süllyedve eltárolná azt. Az AU szintén egy kockázatos tudományos koncepció, hiszen a tengerek, óceánok rétegeinek megbolygatásával az egész bolygó vízkörforgását veszélyeztethetjük. Hatalmas kockázatot jelentene ez a tengeri ökoszisztémákra és a halászatból élő népcsoportokra.

A mesterséges felemeléshez hasonló folyamatok kisebb-nagyobb skálán a természetben is lejátszódnak. Ezeket az átkeveredéseket a szél és a Föld forgása okozza. Kisebb léptékben pedig azok a tengeri élőlények is okoznak átkeveredést, melyek függőlegesen széles területet járnak át az óceánokban, mint a nagy ámbráscet, de ez elhanyagolható mértékű.

A mesterséges felemelés módszerével kapcsolatban folytattak egy kutatást Shandong tartományban, Kínában, az Aoshan-öbölben. Az öböl jó jelölt volt a kísérletre, hiszen egy kevés tápanyagot tartalmazó területről van szó (Fan *et al.*, 2020). A kísérleti AU előtt nem igazán volt olyan terepi alkalmazása a technológiának, mely megerősítené vagy cáfolná a hipotézis valódi hatékonyságát. A projekten dolgozó kutatók egy olyan napenergiával működő emelő-rendszert hoztak létre, mely képes tartósan ellenállni a természeti elemek kihívásainak. A cél, hogy az öbölben található hínár mennyiségét megnöveljék. Ezek a vízi autotróf élőlények fotoszintézis segítségével csökkentik a vízben lévő CO₂ parciális nyomását, így még több CO₂ vízben való oldódását teszik lehetővé. Később ezen növények egy részét betakarítják, egy másik része elsüllyedve az üledékbe temetődik vagy épp szervesen tápanyagokká alakul. Majd a folyamatot előlről kezdik. A kísérlet összességében sikeresnek mondható, ugyanis a hőmérsékleti

eredmények és a tápanyagkoncentráció mérései azt mutatják, hogy a referenciahelyeken a mélyvízi réteget sikerült a felszínre hozni és serkentette is a hínárnövekedést (10. ábra).



10. ábra: A tengeri hínár betakarítása feláramlási (bal oldal) és nem-feláramlási (jobb oldal) területről. Forrás: Fan et al., 2020

A hínárok olyan szempontból jó megoldást nyújthatnak a módszer híveinek, hogy a felesleges tápanyagokat felveszik, így a fitoplanktonok túlszaporodását és az általuk előidézett vízvirágzást gátolják. A hínárok emellett használhatóak műtrágyaként, ami szintén megakadályozná a CO₂ visszajutását a légkörbe, valamint élelmiszerként és ipari alapanyagként is felhasználható. Viszont a hínár túltenyésztése sem tökéletes, mert egy nagy hínártelep szintén oligotróf helyzetet tud teremteni, mivel csökkenti a külső vizekből beáramló tápanyagellátást és rontja a hidrológia viszonyokat, lassítja az áramlásokat. Ez pedig a hínárok gyökér-rohadásához vezet, ami nem csak a szaporodási képességüknek gyengülését okozza, de akár a növekedési időszakban a CO₂ elnyelő tulajdonságuk is a visszájára fordulhat.

3. A geomérnökség hátrányai

Bármennyire is innovatívak és ígéretesek ezek az ötletek és a kísérletek, még várunk kell a technológiák alkalmazásával. Ugyanis, ha a geomérnökség módszereit megfelelő tudás nélkül kezdjük el használni, akkor visszajára sülhet el a dolog.

A CCT módszer, mint az összes többi SRM, nagy hatással lehet a regionális klímára. A modellszimulációk azt mutatják, hogy fokozhatja a hidrológia körforgást, ezáltal erősítheti a Száheli csapadékot és az indiai monszont, ami a térségben élők biztonságát és megélhetését fenyegeti (*Kristjánsson et al., 2015*). Ez a módszer az eddigi kevés elérhető adat miatt és amiatt, hogy akár fordított hatása is lehet és akár gyorsíthatja is a klímaváltozást, komoly kockázatot jelent például a jégsapkák megolvasztása miatt. Ha a károsanyagkibocsátást nem csökkentjük, akkor az MCB és más SRM módszerek is hatástalanná válnak, mert az üvegházhatás túlságosan elhatalmasodik és oly mértékben a légkörön belül tartja a hosszúhullámú sugarakat, hogy a beérkező rövidhullámú sugárzás drasztikus csökkentése sem gátolja meg a felmelegedést (*Kasting, 1988*). A CCT akár a rossz megvalósítása esetén nem, hogy csökkentené a felmelegedést, hanem növelné, így ennél a módszernél a kockázat talán még nagyobb, mint a többi ötlet esetén. A GBAM mesterséges hófedési módszere a kinyerendő víz hatalmas mennyisége miatt komoly ökoszisztéma károsítással fenyegeti a helyi élővilágot.

Emellett a CDR módszereknek is megvan a saját veszélyük. Ugyan ezek akár jelenthetnének valamelyest végleges megoldást a jelenlegi éghajlatváltozási problémákra, azonban a forradalmi áttörésnek még a nyomát sem lehet egyelőre látni, anélkül pedig kevesek lesznek bolygónk megmentéséhez. A legtöbb ilyen típusú eljárás még vagy teljes mértékben elméleti vagy pedig nagyon korai szakaszában jár és csak kis léptékű kísérletezések zajlanak. A legnagyobb problémát pedig az jelentheti, hogyha túlságosan is rájuk támaszkodunk a jövőnkét illetően. Ezek a CDR szisztémák mindenképp részét képezhetik a teljes klímaváltozás elleni küzdelmi stratégiának, azonban nem szabad ezek miatt engedni a kibocsátás-csökkentési célokból, hiszen bármelyik mód csődöt mondhat és akkor nem biztos, hogy elég gyorsan képesek leszünk találni egy „B” tervet. Előfordulhat, hogy olyan eljárások, mint például az OF kiváltják azokat a reakciókat, melyektől tartunk, nevezetesen, esetleg nagyfokú eutrofizációt okoznak. Ugyanígyen valóra vált rémképpé alakulhat az AU, mely hatalmas óceáni ökoszisztémák összeomlását okozhatja a hirtelen vízhőmérséklet változással. A CCS-nél pedig fennáll a veszélye, hogy a szállítás közben a vezetéseken szivárgás keletkezik – például földrengés, talajmozgás vagy egyszerűen rossz tervezés miatt. Az EP a génmódosítási

technológiák általános veszélyével rendelkeznek, tehát a génmódosított, erősebb növények a természetes genetikai állománnyal rendelkező növényeket elnyomják. Az EW eljárás mód által előállított finomra morzsolt kőzetek óceánba való szórásának hatása ismeretlen, így ez a módszer is potenciális veszélyekkel járhat. A DAC óriási költségeivel gazdasági problémákat okozhat, ha ez a geomérnöki módszer válik elsődlegessé és a fenntartható fejlődést gazdasági oldalról fogja gátolni.

A geomérnökség fontos fordulópont lehet a különböző országok diplomáciai kapcsolataiban is a tudományos életen kívül. Ugyanis ezek a módszerek nem alkalmazhatóak, ha csak egy ország csinálja, ehhez globális vagy majdnem globális összefogás szükségeltetik. Ez akár elő is segítheti, hogy az emberek végre ne ellenséget lássanak egymásban, hanem globálisan képesek legyünk összefogni. Ugyanakkor az ellenkezőjét is eredményezheti és a kialakult technológiai versenyszituáció egymással való ellenségeskedésbe is átcsaphat. Diplomáciailag kellemetlen szituációt szülhet akár egy olyan eset, ahol a térség országainak nagy része megegyezik, hogy belevág és nagy skálán alkalmaz valamilyen típusú geomérnökségi módszert, de egy vagy két ország nem egyezik bele. Ebben az esetben az ellenkező országok vagy kénytelenek lesznek eltérni és bizonyos szinten hozzájárulni ahhoz, amit nem szeretnének, vagy viták sorát figyelhetjük meg a témával kapcsolatban, rosszabb esetben pedig akár fegyveres konfliktushoz is vezethet a kérdés.

A geomérnökségi módszerek ellen érvelők sokszor vetik fel az ágazat etikai vonatkozásait. Vajon szabad-e ilyen mértékben belenyúlnunk a természetbe? Talán lehet, hogy az általunk kifejlesztett „gyógyszer” rosszabb, mint maga a betegség és komolyabb tüneteket okozhat a földi rendszerre nézve.

Közös hátránya az összes geomérnökségi ágazatnak a kutatás hiánya. Még egyik módszerre sem mondhatjuk azt, hogy jól bevált, biztonságosan működik és nagy skálán, hatékonyan vagyunk képesek alkalmazni. Ez felveti azt a kérdést, hogy megéri-e egyáltalán belevágni egy ilyen kockázatos vállalkozásba vagy maradjunk a konzervatívabb megoldási lehetőségeknél?

4. Összegzés

A geomérnökség egy érdekes, új tudományos fejezet lehet az emberiség történetében. Biztos vagyok benne, hogy komoly kérdéseket fog felvetni és hosszas vitákat fog indítani mind a tudományos, mind a civil körökben. A globális felmelegedés problémája mindenkit érintő kérdés, ezért fontos, hogy ezt a témát egyre szélesebb része megismerje az embereknek és elkezdjen gondolkodni azon, hogy ő megbízna-e egy ilyen módszerben.

A két alaptípus, a CDR, azaz a szén-dioxid kivonására irányuló módszer és az SRM, azaz a napsugárzás-menedzsment is rendelkezik hátrányokkal és potenciállal, melyek hatalmas segítségünkre lehetnek. Az SRM módszerekhez sorolható a Sztratoszférikus Aeorzol Injekció (SAI), a Tengeri Felhő Fehérités (MCB), a Cirrus Felhő Vékonyítás (CCT), a Talajmenti Albedó Módosítás (GBAM) és a Mikrobuborékok/Tengeri Hab készítése (MB/SF), amelyek többsége a sugárzásvisszaverő képesség növelésén alapszik. A CDR módszerek csoportjába a Szén-leválasztás és -tárolás (CCS), a Közvetlen Légbefogás (DAC), az Óceán „Trágyázása” (OF), a Fokozott Mállás (EW), a Fokozott Fotoszintézis (EP) és a Mesterséges Felemelés (AU) sorolható, amelyek az üvegházhatást igyekeznek mérsékelni különböző megközelítésekkel. De egyelőre még nem egyértelmű, hogy melyik módszernél merre billen el a mérleg nyelve és megéri-e majd őket alkalmazni a valóságban, akár együtt, egymást kiegészítve vagy külön-külön. Bár mindkét módszer meglehetősen drága és kockázatos befektetésnek tűnik jelen pillanatban, ám ha nem cselekszünk semmit, akkor a klímaváltozás következményei már pénzben nem mérhető károkat fognak okozni mindenki számára. Ugyanakkor lehet, hogy a geomérnökség olyan károkat fog okozni, melyek csak közelebb hozzák a civilizációnk végét.

A szakdolgozatban megjelenő technológiák még nagyon kezdetlegesek és a valóságban, nagy skálán még egyikük sincs alkalmazva napjainkban és lehetséges, hogy nagy részük soha nem is fog éles bevetésre kerülni. A CDR módszerek használatának nagyobb a valószínűsége, ugyanis ezekkel a módszerekkel akár késleltethetjük is a valós átállást a zéró kibocsátási technológiákra. Míg ezzel szemben, egy SRM módszert hiába alkalmazunk, egy idő után már nem lehet annyi napsugárzást visszaverni, hogy a bolygó légköre ne melegedjen tovább.

Én úgy gondolom, hogy egy nagyon érdekes témáról és tudományos lehetőségéről van szó és mindenképpen folytatni kell a kutatásokat és finomítani kell a technológiákon. Ameddig nem muszáj, nem kell őket használni, csak a modelleket finomítani, további megoldási stratégiákon dolgozni, hogy a geomérnökség jelenleg fennálló kockázatait minimálisra szorítsuk. Minden bizonnyal még rengeteg különböző ötlet fog felmerülni addig, míg az egyiket a jövőben a

valóságban is használhatjuk a felmelegedés lassításához. A legbiztosabb megoldás mindenesetre az lenne, ha konzervatív úton, az energiafelhasználásunk visszaszorításával és a nem megújuló fosszilis energiahordozók elhagyásával sikerülne megoldani a klímaváltozás problémáját. Azonban, ha ez nem lenne sikeres, átlépnénk a Párizsi Megállapodásban meghatározott hőmérsékleti határvonalakat és csekély esélyünk maradna a folyamatok visszafordítására. Ez a tudományos terület újabb opcióként szolgálhat az emberiség és még sok más faj fennmaradásához.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Kis Annának, a témavezetőmnek, hogy segítségével támogatta a szakdolgozatom elkészülését! Továbbá köszönöm szépen a családomnak és barátaimnak a támogató háttérrel, mely hozzásegített a nyugodt munkához!

Irodalomjegyzék

- Bluth, G. J. S., Doiron, S. D., Schnetzler, C. C., Krueger, A. J., Walter, L. S., 1992: Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions. *Geophysical Research Letters*, 19(2): 151–154. <https://doi.org/10.1029/91GL02792>
- Burns, W., Nicholson, S., 2017: Bioenergy and carbon capture with storage (BECCS): the prospects and challenges of an emerging climate policy response. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 7: 527–534. <https://doi.org/10.1007/s13412-017-0445-6>
- Bartholy, J., Mészáros, R., Geresdi, I., Matyasovszki, I., Pongrácz, R., Weidinger, T., 2013: *Meteorológiai Alapismerek* (Szerk.: Bartholy J., Mészáros R.). Egyetemi jegyzet. Eötvös Loránd Tudományegyetem, 266p.
- Crook, J. A., Jackson, L.S., Forster, P. M., 2016: Can increasing albedo of existing ship wakes reduce climate change?, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121: 1549–1558. <https://doi.org/10.1002/2015JD024201>
- Ermakova, M., Danila, F. D., Furbank, R. T., von Caemmerer, S., 2019: On the road to C₄ rice: advances and perspectives. *The Plant Journal*, 101: 940–950. <https://doi.org/10.1111/tpj.14562>
- Fan, W., Zhang, Z., Yao, Z., Xiao, C., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, J., Di, Y., Chen, Y., Pan, Y., 2020: A sea trial of enhancing carbon removal from Chinese coastal waters by stimulating seaweed cultivation through artificial upwelling. *Applied Ocean Research*, 101: 102260. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102260>
- Field C. B., Mach K. J., 2017: Rightsizing carbon dioxide removal. *Science*, 356(6339): 706–707. <https://doi.org/10.1126/science.aam9726>
- Field L., Ivanova D., Bhattacharyya S., Mlaker V., Sholtz A., Decca R., Manzara A., Johnson D., Christodoulou E., Walter P., Katuri K., 2018: Increasing Arctic Sea Ice Albedo Using Localized Reversible Geoengineering. *Earth's Future*, 6(6): 882–901. <https://doi.org/10.1029/2018EF000820>
- Feldmann J., Levermann A., Mengel M., 2019: Stabilizing the West Antarctic Ice Sheet by surface mass deposition. *Science Advances*, 5(7): eaaw4132. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw4132>
- Harangi Sz., 2017: Vulkánkitörések klímaváltoztató hatása: a kicsi is számít!, *Magyar Tudomány* 2017/6: 664–673.
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E.A., Fuss, S., MacDowell, N., Minx, J.C., Smith, P., Williams, C.K., 2019: The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature*, 575: 87–97. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1681-6>
- 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* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Kasting, J.F., 1988: Runaway and Moist Greenhouse Atmospheres and the Evolution of Earth and Venus. *Icarus*, 74: 472–494. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90116-9](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90116-9)
- Kartha, S., Dooley, K., 2016: The risks of relying on tomorrow's 'negative emissions' to guide today's mitigation action, Stockholm Environment Institute, SEI Working Paper 2016-08
- Keith, D., Holmes, G., St. Angelo, D., Kenton, H., 2018: A process for capturing CO₂ from the atmosphere. *Joule*, 2(8): 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Kristjansson, J.E., Muri, H., Schmidt, H., 2015: The hydrological cycle response to cirrus cloud thinning. *Geophysical Research Letters*, 42: 10807–10815. <https://doi.org/10.1002/2015GL066795>

- Latham, J., Bower, K., Choularton, T., Coe, H., Connolly, P., Cooper, G., Craft, T., Foster, J., Gadian, A., Galbraith, L., Iacovides, H., Johnston, D., Launder, B., Leslie, B., Meyer, J., Neukermans, A., Ormond, B., Parkes, B., Racsh, P., Rush, J., Salter, S., Stevenson, T., Wang, H., Wang, Q., Wood, R. 2012: Marine Cloud Brightening. *Philosophical transactions, Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 370: 4217–4262. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0086>
- Lawrence, M.G., Schafer, S., Muri, H., Scott, V., Oshlies, A., Vaughan, N.E., Boucher, O., Schmidt, H., Haywood, J., Scheffran, J., 2018: Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications*, 9: 37374. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- Lee, X., Goulden, M.L., Hollinger, D.Y., Barr, A., Black, T.A., Bohrer, G., Bracho, R., Drake, B., Goldstein, A., Gu, L., Katul, G., Kolb, T., Law, B.E., Margolis, H., Meyers, T., Monson, R., Munger, W., Oren, R., U, K.T.P., Richardson, A.D., Schmid, H.P., Staebler, R., Wofsy, S., Zhao, L., 2011: Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 479: 384–387. <https://doi.org/10.1038/nature10588>
- Long, S.P., Marshall-Colon, A., Zhu, X-G., 2015: Meeting the Global Food Demand of the Future by Engineering Crop Photosynthesis and Yield Potential. *Cell*, 161(1): 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.03.019>
- Lockley, A., Mi, Z., Coffman, D., 2019: Geoengineering and the blockchain: Coordinating Carbon Dioxide Removal and Solar Radiation Management to tackle future emissions. *Frontiers of Engineering Management*, 6: 38–51. <https://doi.org/10.1007/s42524-019-0010-y>
- Miyao, M., Masumoto, C., Miyazawa, S.-I. and Fukayama, H., 2011: Lessons from engineering a single-cell C4 photosynthetic pathway into rice. *Journal of Experimental Botany*, 62: 3021–3029. <https://doi.org/10.1093/jxb/err023>
- Morton, O., 2009: Crops that cool. *Nature*, <https://doi.org/10.1038/news.2009.33>
- O’Sullivan, J. N., 2020: The Social and Environmental Influences of Population Growth Rate and Demographic Pressure Deserve Greater Attention in Ecological Economics. *Ecological Economics*, 172: 106648. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106648>
- Pálffy, K., 2013: Társadalmi konfliktusokat generáló ökológiai történések a Balaton életében az utóbbi néhány évtizedben – A víz zöld elszíneződése, az eutrofizáció. *Acta Scientiarum Socialium*, 39: 37–44. <https://journal.uni-mate.hu/index.php/asc/article/view/314>
- Qirui, Z., Huizhong, S., Xiao, Y., Yilin, C., Yu’ang, R., Haoran, X., Guofeng, S., Wei, D., Jing, M., Wei, L., Jianmin, M., Shu, T., 2020: Global Sulfur Dioxide Emissions and Driving Forces. *Environmental Science & Technology*, 54(11): 6508–6517. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b07696>
- Ping, E., Sakwa-Novak, M., Eisenberger, P., 2018: Global thermostat low cost direct air capture technology. In: *International Conference on Negative CO2 Emissions*, Gothenburg, May. 2018. p. 22–24.
- Reynolds, J.L., 2019: Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. *Proceedings of the Royal Society A*, 475: 20190255. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0255>
- Richter, R.D., Caillol, S., Tingzhen, M., 2019: Geoengineering: Sunlight reflection methods and negative emissions technologies for greenhouse gas removal. *Managing Global Warming*, 20: 581–636. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00020-X>
- Robinson, J., Popova, E.E., Yool, A., Srokosz, M., Lampitt, R.S., Blundell, J.R., 2014: How deep is deep enough? Ocean iron fertilization and carbon sequestration in the Southern Ocean. *Geophysical Research Letters* 41: 2,489–2,495. <https://doi.org/10.1002/2013GL058799>
- Robock, A., 2003: Introduction: Mount Pinatubo as a Test of Climate Feedback Mechanisms. *Geophysical Monograph Series*, 139: 1–8. <https://doi.org/10.1029/139GM01>
- Russell, L.M., Sorooshian, A., Seinfeld, J.H., Albrecht, B.A., Nenes, A., Ahlm, L., Chen, Y-C., Coggon, M., Craven, J.S., Flagan, R.C., Frossard, A.A., Jonsson, H., Jung, E., Lin, J.J., Metcalf, A.R., Modini,

- R., Mülmenstadt, J., Roberts, G., Shingler, T., Song, S., Wang, Z., Wonaschütz, A., 2012: Eastern Pacific Emitted Aerosol Cloud Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(5): 709–729. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00015.1>
- Seitz, R., 2011: Bright water: hydrosols, water conservation and climate change. *Climatic Change*, 105: 365–381. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9965-8>
- Smith, W., Wagner, G., 2018: Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environmental Research Letters*, 13(12): 124001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae98d>
- Socolow, R., Desmond, M., Aines, R., Blackstock, J., Bolland, O., Kaarsberg, T., Lewis, N., Mazzotti, M., Pfeffer, A., Sawyer, K., Sirola, J., Smit, B., Wilcox, J., 2011: Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals, A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs,
- Schneider, L., 2019: Fixing the Climate? How Geoengineering Threatens to Undermine the SDGs and Climate Justice. *Society for International Development*, 62: 29–36. <https://link.springer.com/article/10.1057%2Fs41301-019-00211-6>
- Strefler, J., Amann, T., Bauer, N., Kriegler, E., Hartmann, J., 2018: Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, 13(3): 034010. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaa9c4>
- Stroerlmo, T., Kristjansson, J.E., Muri, H., Pfeffer, M., Barahona, D., Nenes, A., 2013: Cirrus cloud seeding has potential to cool climate. *Geophysical Research Letters*, 40: 178–182. <https://doi.org/10.1029/2012GL054201>
- Summerhayes, C.P., Zalasiewicz, J., 2018: Global warming and the Antropocen. *GeologyToday*, 34(5): 194–200. <https://doi.org/10.1111/gto.12247>
- Szöke, D., 2018: Jó ötlet meghekkelni a Földet? A geoengineering (bolygómérnöksége) kilátásai a klímaváltozás elleni küzdelemben. KKI-elemzések (Külügyi és Külgazdasági Intézet), E-2018/07. ISSN 2416-0148. 11p.
- Thakura, I.S., Kumara, M., Varjanib, S.J., Yonghong, W., Gnansounou, E., Ravindran, S., 2018: Sequestration and utilization of carbon dioxide by chemical and biological methods for biofuels and biomaterials by chemoautotrophs: Opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, 256: 478–490. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.039>
- Tollefson, J., 2021: Can artificially altered clouds save the Great Barrier Reef? *Nature*, 596: 476–478, ISSN 1476-4687. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02290-3>
- WMO, 2021: State of the global climate 2020. WMO-No. 1264. 56p.
- Zheng, B., Geng, G., Ciais, P., Davis, S.J., Martin, R.V., Meng, J., Wu, N., Chevallier, F., Broquet, G., Boersma, F., van der A, R., Lin, J., Guan, D., Lei, Y., He, K., Zhang, Q., 2020: Satellite-based estimates of decline and rebound in China's CO₂ emissions during COVID-19 pandemic. *Science Advances*, 6(49): eabd4998. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4998>

Internetes hivatkozások

[1 – eur-lex.europa]: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=HU](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=HU)

[2 – Our World in Data]: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

[3 – geoengineeringmonitor]: <https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2021/04/marine-cloud-brightening.pdf>

[4 – NASA]: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols/page4.php>

[5 – geoengineeringmonitor]: <https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2021/04/cirrus-cloud-thinning.pdf>

[6 – geoengineeringmonitor]: <https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2021/04/surface-albedo-modification.pdf>

[7 – geoengineeringmonitor]: https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2021/04/enhanced_microbubbles.pdf

[8 – geoengineeringmonitor]: <https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2021/04/carbon-capture-and-storage.pdf>

[9 – NASA]: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>

[10 – geoengineeringmonitor]: <https://www.geoengineeringmonitor.org/wp-content/uploads/2021/04/enhanced-weathering.pdf>