Geoinženjering – metoda fertilizacije oceana željezom

Matek, Antonija

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:649631

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

GEOINŽENJERING – METODA FERTILIZACIJE OCEANA ŽELJEZOM

GEOENGINEERING- OCEAN IRON FERTILIZATION METHOD

SEMINARSKI RAD

Antonija Matek
Preddiplomski studij biologije
(Undergraduate Study of Biology)
Mentor: doc. dr. sc. Sunčica Bosak

Zagreb, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. GEOINŽENJERING 1
2.1 FERTILIZACIJA OCEANA 2
3. DISTRIBUCIJA ŽELJEZA U OCEANU I ULOGA U ZAJEDNICI FITOPLANKTONA 3
4. EKSPERIMENTI FERTILIZACIJE OCEANA ŽELJEZOM 4
4.1. NEŽELJENI UČINCI NA EKOSUSTAV 6
4.1.1. EUTROFIKACIJA I ANOKSIJA 6
4.1.2. ACIDIFIKACIJA OCEANA 7
4.1.3. PRODUKCIJA OSTALIH STAKLENIČKIH PLINOVA 7
4.1.4. MODIFIKACIJA GLOBALNE RAVNOTEŽE MAKRONUTRIJENATA I ŽELJEZA 10
4.1.5. PROMJENA STRUKTURE BIOCENOZA PELAGIJALA I BENTOSA 10
4.2. EFIKASNOST METODE 11
5. PRIJEDLOZI ZA POBOLJŠANJE METODE 13
6. PRAVNO UREĐENJE 14
6.1. ILEGALNI EKSPERIMENT FERTILIZACIJE OCEANA ŽELJEZOM 15
7. ZAKLJUČAK 17
8. LITERATURA 18
9. SAŽETAK 21
10. SUMMARY 21

1. UVOD

U područjima otvorenog oceana koja su bogata nutrijentima, ali siromašna klorofilom (eng. *high nutrient low chlorophyll* (HNLC)) još 1988. godine predložena je hipoteza koja pretpostavlja da je niska koncentracija željeza limitirajući čimbenik u rastu i razvoju primarnih producenata – fitoplanktona (Martin i Fitzwater, 1988). Spekulira se o potencijalnom dodavanju željeznih spojeva u u HNLC oceanska područja čime bi se potaknuo rast fitoplanktona te primarna produkcija. Time bi se smanjila koncentracija ugljikovog dioksida (CO_2) u površinskom osvijetljenom sloju oceana te povećala stopa difuzije iz atmosfere. Nakon objave navedene hipoteze, fertilizacija oceana željezom kao potencijalna metoda geoinženjeringa klimatskih promjena pobuđuje sve veću pažnju znanstvene zajednice i javnosti (Smetacek i Naqvi, 2008).

U relativno kratkom razdoblju izvedeno je 13 različitih eksperimenata fertilizacije oceana željezom čiji je cilj bio bolje razumjeti ulogu željeza u zajednici fitoplanktona HNLC oceanskih područja te njegovog utjecaja na biogeokemijske procese u površinskom sloju oceana (Lampitt i sur., 2008). Nakon što se uspostavilo da komercijalna primjena fertilizacije oceana željezom može imati loše posljedice na morski ekosustav i njegov hranidbeni lanac, članice UN-a su provele pravno uređenje provedbe fertilizacije oceana željezom kojim je određen radni okvir za eksperimente koji će biti provođeni u budućnosti. Fertilizacija oceana dopuštena je jedino u sklopu znanstvenih istraživanja, a komercijalan pristup je zabranjen dok se adekvatnim matematičkim modelima i parametarizacijom dobivenih podataka ne dokaže efikasnost metode na velikoj vremenskoj (minimalno 100 godina) i prostornoj (minimalno 100km^2) skali te predvide mogući rizici za bioraznolikost, ekonomiju i društvo (Williamson i sur., 2012).

2. GEOINŽENJERING

Geoinženjering obuhvaća niz velikih zahvata i namjernu primjenu tehnologije u Zemljinom okolišu s ciljem ublažavanja posljedica klimatskih promjena i uklanjanja njihovih štetnih učinaka na ekosustave (Williamson i sur., 2012).

Klimatske promjene se primarno odnose na globalno zagrijavanje atmosfere koje je uzrokovano povećanjem koncentracije stakleničkih plinova poput ugljikovog dioksida, dušikovih oksida, metana i vodene pare u atmosferi. Sunčevo zračenje koje prolazi kroz

atmosferu do Zemljine površine sastoji se od zračenja kraćih valnih duljina koje zagrijavaju čestice atmosfere i tla emitirajući toplinu u obliku infracrvenog zračenja većih valnih duljina. Određeni postotak infracrvenog zračenja se emitira u svemir, a ostatak ostaje zarobljen u atmosferi zbog prisutnosti elemenata koji apsorbiraju veće valne duljine (staklenički plinovi). Time se Zemljina atmosfera zagrijava i onemogućuju se ekstremno niske temperature pri kojima život na Zemlji ne bi bio moguć. Ipak, antropogeno uzrokovana povećana koncentracija stakleničkih plinova dovodi do jačeg zagrijavanja atmosfere i posljedičnih klimatskih promjena koje se nastoje smanjiti geoinženjeringom (Filipčić, 1996).

Dva glavna pristupa u geoinženjeringu su uklanjanje stakleničkih plinova iz atmosfere kemijskim ili biološkim metodama (eng. *carbon dioxide removal* (CDR)) te upravljanje solarnom radijacijom (eng. *solar radiation managment* (SRM)), a temelje se na modifikaciji Zemljine energetske bilance. SRM se odnosi na povećanu refleksiju kratkovalnog zračenja ili povećanu emisiju infracrvenog zračenja sa Zemljine površine i atmosfere u svemir (Williamson i sur., 2012).

2.1 FERTILIZACIJA OCEANA

Jedna od prvih predloženih metoda geoinženjeringa je fertilizacija oceana koja ima u cilju smanjenje stakleničkih plinova (CDR pristup). Temelji se na unosu limitirajućeg nutrijenta u površinske slojeve vode ili poticanjem njegovog recikliranja iz dubljih slojeva radi poticanja primarne produkcije te posljedičnog uklanjanja CO_2 iz atmosfere. CO_2 asimiliran u organsku tvar mora potonuti ispod granice vertikalnog miješanja (200-1000m) i reasimilirati se u sediment da bi se definirao kao odvojen od atmosfere na dugi vremenski period od više stoljeća (Williamson i sur., 2012).

Kruženje ugljika odvija se u oceanima između površinskih i dubokih slojeva oceana procesima fotosinteze i respiracije. Fotosinteza dominira u površinskoj eufotičkoj zoni (do 200m dubine) kroz koju prodire svjetlosno zračenje koje omogućuje fotosintezu i asimilaciju CO_2 u organsku tvar. Ispod 200m nema svjetlosti te se tamo odvijaju procesi respiracije kojima se iskorištava organska tvar i reciklira anorganski ugljik i nutrijenti. Tijekom vertikalnog izmješavanja vodenog stupca dolazi do ponovne opskrbe površine sa nutrijentima i anorganskim ugljikom. Dio globalnog biogeokemijskog ciklusa ugljika su biološka i kemijska pumpa, procesi u ekosustavu mora koji utječu na uklanjanje CO_2 iz atmosfere. Kemijska pumpa se temelji na fizičkim svojstvima vode (temperatura, gustoća) koji utječu na brzinu otapanja i poniranja CO_2 u dubine koja je veća u hladnijem moru viših geografskih

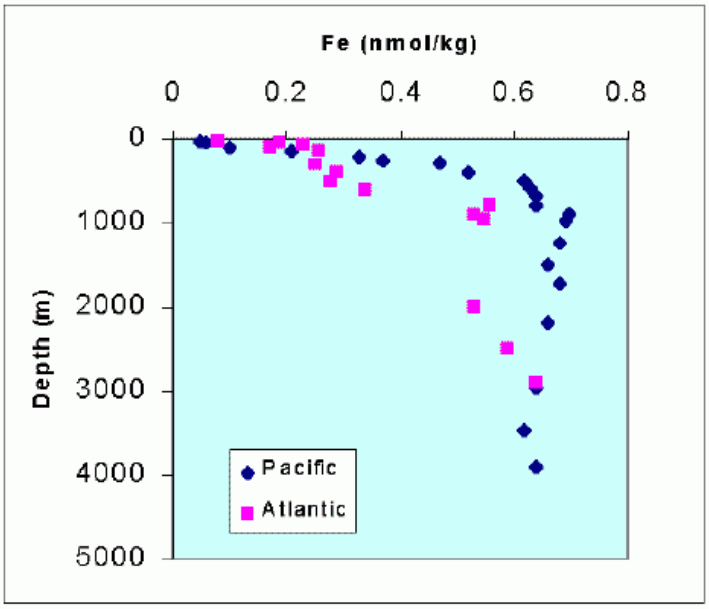
širina. Razlog tome jest veća topljivost CO_2 u hladnijoj vodi koja je gušća od toplije vode i ponire u dubine. Uklanja se otopljeni CO_2 iz površinskog sloja, smanjuje se njegov parcijalni tlak te pospješuje topljenje novog CO_2 iz atmosfere u površinskom sloju oceana. Biološka pumpa može biti organska i karbonatna, a odnosi se na biološke procese (formiranje organske tvari procesom fotosinteze i kalcifikacije – proces formiranja ljušturica i skeleta od kalcijevog karbonata) u površinskim slojevima mora koji povećavaju koncentracijski gradijent CO_2 uslijed njegova iskorištavanja i time ubrzavaju njegovu difuziju iz atmosfere (Lampitt i sur., 2008).

Fertilizacijom oceana pospješuje se biološka pumpa pri čemu se povećava difuzija CO_2 iz atmosfere. Može se provoditi dodatkom željeza kao limitirajućeg mikronutrijenta, dodatkom makronutrijenata poput fosfora i nitrata ili namjernim dovođenjem duboke vode bogate nutrijentima u površinske slojeve (eng. *artificial upwelling*). Najviše eksperimenata fertilizacije oceana provođeno je dodatkom željeza (Williamson i sur., 2012).

3. DISTRIBUCIJA ŽELJEZA U OCEANU I ULOGA U ZAJEDNICI FITOPLANKTONA

Željezo u moru nalazimo u tri veličinske frakcije: topivoj (<200kDa), koloidnoj (200kDa - 0,2μm) i čestičnoj (>0,2μm). Slobodno anorgansko trovalentno željezo je vrlo reaktivno i brzo ulazi u komplekse pa se adsorpcijom brzo veže na čestice koje tonu ili gradi organske komplekse (ligandi – molekule ili ioni koji se vežu za metale i stvaraju organske komplekse koji se vežu na ciljane proteine), a u moru se uglavnom nalazi u netopivom obliku $Fe(OH)_2^-$ u niskim koncentracijama (prosječna koncentracija je 540 pmol/kg) (http://www.mbari.org/chemsensor/pteo.htm) i stoga nedostupno za fitoplankton. Dvovalentni reducirani oblik željeza nalazi se u topivoj frakciji i on je dostupan fitoplanktonu za apsorpciju i biološko iskorištavanje, a nastaje u fotokemijskim reakcijama pri čemu se reducira iz trovalentnog željeza (de Baar, 2005).

Posljedica reaktivnosti slobodnog željeza je brzo nestajanje iz površinskog sloja vodenog stupca pa njegova koncentracija raste prema dubini, a distribucija kroz vodeni stupac je nekonzervativna (reciklirajuća) (Slika 1.). Na temelju brzine adsorpcije željeza na tonuće čestice u vodenom stupcu procijenjeno je vrijeme zadržavanja u oceanu (eng. *residence time*) koje je vrlo kratko (Johnson i sur., 1997).



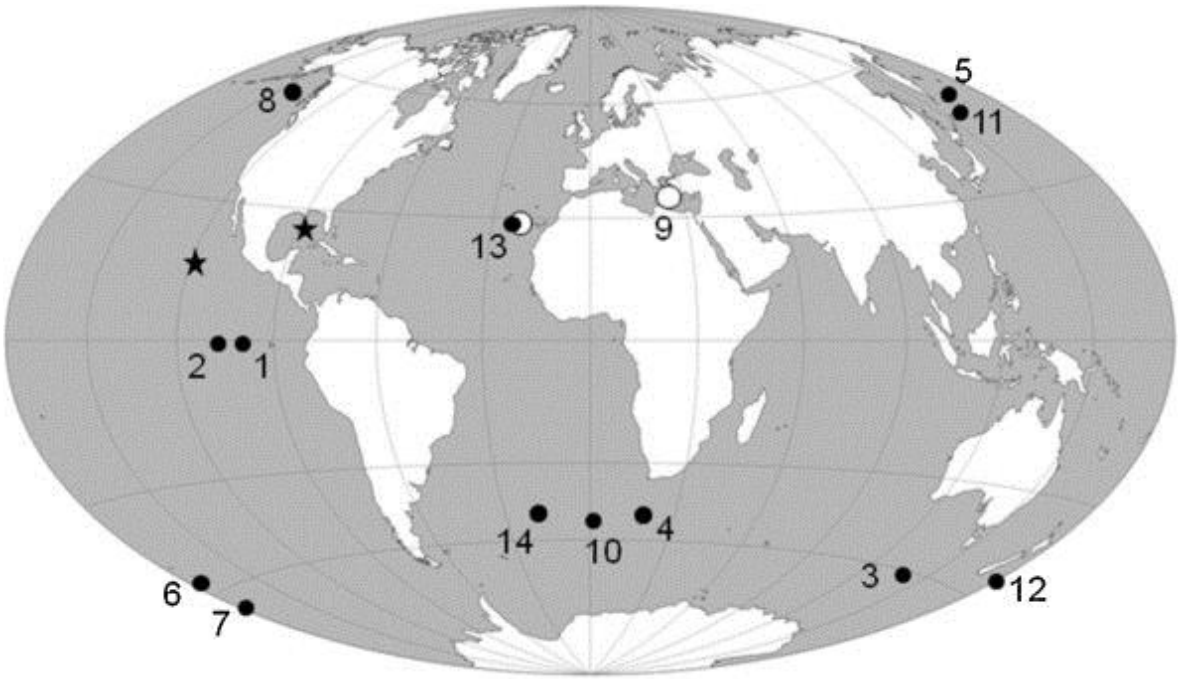
Slika 1. Koncentracija željeza na različitim dubinama u Atlantskom i Tihom oceanu. Iz priloženog je vidljivo da koncentracija željeza prema većim dubinama raste. (Preuzeto s: http://www.mbari.org/science/upper-ocean-systems/chemical-sensor-group/periodic-table-of-elements-in-the-ocean/)

Fitoplanktonskim stanicama za primarnu produkciju nisu neophodni samo CO_2 i svjetlo, već i biološki dostupni makronutrijenti (dušik, fosfor, sumpor) te elementi u tragovima (npr. željezo) koji su u oceanu dostupni remineralizacijom organskog materijala koji tone ili dovođenjem sa kopna rijekama ili atmosferskom prašinom. Željezo se u oceanu nalazi u niskim koncentracijama (<1ppm (eng. *parts per million*)), a u HNLC regijama oceana je limitirajući nutrijent u primarnoj produkciji fitoplanktona pa o njegovoj koncentraciji ovisi intenzitet fotosinteze i rast biomase fitoplanktona (Lampitt i sur., 2008). U stanicama fitoplanktona ima ulogu enzimskog kofaktora koji ubrzava reakcije, a u fotosintezi je građevni element citokroma i feredoksina, proteinskih kompleksa koji su dio prijenosnog lanca elektrona. Također sudjeluje u sintezi klorofila i redukciji ugljikovog dioksida, nitrata i sulfata tijekom sinteze organske tvari pri fotosintezi (Street i sur., 2005).

4. EKSPERIMENTI FERTILIZACIJE OCEANA ŽELJEZOM

Od 1993. do 2009. godine provedeno je 13 eksperimenata fertilizacije oceana željezom. Eksperimenti su se provodili u HNLC regijama gdje željezo limitira primarnu produkciju. Provođeni su u Sjevernom Pacifiku, tropskom Pacifiku, Južnom Oceanu i tropskom Atlantiku (Slika 2.). Tijekom eksperimenata željezo je dodavano u obliku željezovog sulfata ($FeSO_4$ x

H_2O), njegove topljive forme, a u fertilizirani sloj vode je dodan i sumporov heksafluorid (SF_6) koji složi kao marker za praćenje kretanja željeza (de Baar i sur., 2005). Ugljik sadržan u biomasi tone, pri čemu manje od 1% stigne do morskog dna te se remineralizira u sedimentu (Williamson i sur., 2012). Eksperimenti su provođeni kako bi se dokazala uloga željeza u fotosintezi i njegov utjecaj na biogeokemijske procese u oceanu, iako je konačni cilj fertilizacije oceana željezom uklanjanje viška ugljika iz atmosfere pa se predlaže da budući eksperimenti budu fokusirani na put ugljika prouzročen fertilizacijom (Williamson i sur., 2012).



Slika 2. Područja provedbe eksperimenata fertilizacije oceana u vremenskom periodu 1993.-2009. Prazni krugovi predstavljaju fertilizaciju oceana fosforom, crni krugovi željezom, a zvijezde označuju komercijalnu provedbu fertilizacije oceana željezom (preuzeto od Williamson i sur., 2012)

Tijekom svih eksperimenata primijećene su određene promjene u ekosustavu kao posljedica dodavanja željeza. Primijećeno je povećanje koncentracije klorofila *a* (Boyd i sur., 2007) i stope fotosinteze u stanicama fitoplanktona (Behrenfeld i sur., 1996). Također je primijećen porast biomase fitoplanktona stime da je efekt izraženiji u bolje osvijetljenim i toplijim morima (Boyd, 2002; Boyd i sur., 2007). Promijenila se struktura zajednice nestajanjem manjih veličinskih kategorija (cijanobakterije) i dominacijom većih (dijatomeje) (Boyd i sur., 2007). Također, povećana je bakterijska produkcija i biomasa (Hale i sur., 2006; Agawin i sur.,2006; Kudo i sur., 2009). Odgovor populacija zooplanktona i riba na promjene

u ekosustavu nije zabilježen zbog ograničenog vremenskog trajanja samih eksperimenata (Williamson i sur., 2012).

Ugljik odvojen iz atmosfere i ugrađen u fitoplanktonsku biomasu se kvantificira te se određuje prosječno vrijeme trajanja njegovog uklanjanja. Dobiveni parametri se unose u adekvatne modele kojima se predviđa efikasnost fertilizacije oceana na velikoj prostornoj i vremenskoj skali. Osim toga, potrebno je provoditi monitoring kojim se prati razvoj određenih neželjenih posljedica fertilizacije (Williamson i sur., 2012).

4.1. NEŽELJENI UČINCI NA EKOSUSTAV

Antropogeno unošenje željeza u ocean s ciljem uklanjanja CO_2 iz atmosfere može imati i druge popratne učinke koji nisu svrha eksperimenata i mogu potencijalno biti štetni za ekosustav. Neke od neželjenih i potencijalno štetnih promjena zabilježenih u dosadašnjim eksperimentima su eutrofikacija i anoksija tretiranog vodenog stupca, modifikacija pH, promjena u ravnoteži makronutrijenata i željeza, poticanje produkcije drugih stakleničkih plinova te strukturne promjene u zajednici organizama pelagijala i bentosa. Uzrok svakog od navedenih promjena i njihove posljedice na ekosustav ćemo konkretnije objasniti u ovome poglavlju. Potrebno ih je detaljno istražiti i razumjeti kako bi se, prije potencijalne komercijalne primjene fertilizacije oceana željezom, mogao procijeniti rizik štete za ekosustav (Lampitt i sur., 2008).

4.1.1. EUTROFIKACIJA I ANOKSIJA

Unutar fertilizanog vodenog stupca dolazi do intenzivnije produkcije organske tvari pa područje postaje eutrofno. Eutrofikacija ovisi o prisutnoj cirkulaciji vodenih masa i blizini kontinentalnog šelfa u kojem je produktivnost veća pa horizontalni prijenos može biti izvor dodatne organske tvari. Pri tome dolazi do tonjenja povećane količine organske tvari (eng. *particulate organic carbon* (POC)) ispod eufotičke zone gdje ju razgrađuju heterotrofne bakterije uz veliku potrošnju kisika pa na većim dubinama (mezopelagijal, abisal) može doći do hipoksije, stanja niske koncentracije kisika u ekosustavu, a i do anoksije, stanja bez kisika. Hipoksija, odnosno anoksija može imati vrlo štetan učinak na ekosustav jer se vrlo mali broj vrsta može prilagoditi na nastale uvjete.

Eutrofikacija podrazumijeva unošenje dodatne količine nutrijenata u sustav što može uzrokovati preraspodjelu njihovog omjera. Poremećeni omjer prisutnih nutrijenata (N:P:Si)

može uzrokovati strukturne promjene u zajednici fitoplanktona, primjerice obogaćenje vodenog sloja s nitratima u odnosu na silikate poticati će razvoj flagelata u odnosu na dijatomeje, a obogaćenje u odnosu na fosfor može uzrokovati pretjerani razvoj mikroalgi (eng. *harmful algal blooms* (HAB)) što može štetno utjecati na razvoj ribljeg fonda. Mogući je i utjecaj na strukturu bentičkih zajednica čija se bioraznolikost smanjuje u fertiliziranim eutrofnim područjima u odnosu na oligotrofna.

Zbog svega navedenog, tijekom fertilizacije treba uzeti u obzir karakteristike ekosustava (biološka struktura zajednice), blizinu kontinentalnog šelfa i cirkulacije vodene mase tretiranog morskog područja kako bi se moglo procijeniti kako će povećani intenzitet produkcije organske tvari i njezinog tonjenja u obliku POC utjecati na život u ekosustavu (Lampitt i sur., 2008).

4.1.2. ACIDIFIKACIJA OCEANA

Zadnjih 25 milijuna godina pH vrijednost oceana je u prosjeku 8.0-8.3 (Lampitti sur., 2008). Povećana koncentracija CO_2 u atmosferi uzrokovana ljudskim djelovanjem uzrokuje povećanje njegove koncentracije u površinskom sloju oceana gdje se zato smanjuje pH vodene mase (acidifikacija). Fertilizacija oceana željezom dovodi do redukcije CO_2 u površinskom sloju tretiranog vodenog stupca zbog povećane stope fotosinteze i smanjuje stopu acidifikacije. Acidifikacija oceana je posljedica globalnog zatopljenja i njezina redukcija je poželjna za ekosustav. Ipak ovaj efekt je održiv samo u površinskom sloju, dok u mezopelagijalu dolazi do suprotnog učinka, povećane stope acidifikacije zbog povećane koncentracije CO_2 uzrokovane remineralizacijom povećane biomase koja tone sa površine fertiliziranog vodenog stupca. Gledajući na velikoj prostornoj i vremenskoj skali, fertilizacija bi mogla uzrokovati acidifikaciju u dubljim slojevima oceana, a vrlo male promjene pH bi jako utjecale na život u moru, posebice na dubokooceanske organizme poput spužvi, koralja i mekušaca čije bi se stanište mijenjalo s obzirom na granicu pH unutar koje se odvija remineralizacija POC i produkcija minerala potrebnih za izgradnju ljuštura ili drugih struktura. Zbog toga je važno razmotriti rizičnost provedbe fertilizacije oceana željezom s obzirom na mogućnost povećane stope acidifikacije (Williamson i sur., 2012).

4.1.3. PRODUKCIJA OSTALIH STAKLENIČKIH PLINOVA

Posljedica hipoksije je produkcija halokarbonata (metabolički produkti fitoplanktona) te dušikovog oksida (N_2O) i metana (CH_4) koji nastaju prilikom biološke razgradnje POC-a u

prisustvu niske koncentracije kisika. Jači su stakleнički plinovi od CO_2 i njihova produkcija i emisija u atmosferu stvorile bi protuučinak, iako bi veći problem bio visoka koncentracija N_2O iz razloga što se ne iskorištava za energiju kao metan (Williamson i sur., 2012). U morskim područjima gdje prirodno dominira stanje niske koncentracije kisika (tropi) postoji veći rizik od hiperprodukcije N_2O tijekom fertilizacije pa bi se eksperimenti trebali provoditi u hladnijim morima sa višom koncentracijom kisika, primjerice u Južnom Oceanu (Jin i Gruber, 2003).

Navedeni plinovi imaju pozitivni RF (eng. *radiative forcing*- razlika između sunčevog zračenja koje dolazi na Zemlju i infracrvenog zračenja koje se reflektira u svemir, mjerna jedinica je W/m^2) koji upućuje na zagrijavanje atmosfere. Ipak, fertilizacija oceana potiče i produkciju dimetilsulfida (DMS), plina koji ima negativni RF i potiče hlađenje atmosfere. DMS djeluje kao jezgra nukleacije oblaka u atmosferi. Naoblaka smanjuje insolaciju, povećava refleksiju kratkovalnog zračenja u svemir i hladi atmosferu (Haigh, 2002). Zbog toga bi produkcija DMS-a, kojeg najintenzivnije produciraju dijatomeje, dinoflagelati i kokolitoforidi (Keller i sur., 1989), bila željeni efekt fertilizacije (Tablica 1.) (Williamson i sur., 2012).

Tablica 1. Plinovi i aerosoli koji utječu na energetsku bilancu Zemlje. RF (eng, *radiative forcing*) plinova i aerosola, godišnja emisija u iz oceana u atmosferu i čimbenici uzrokovani fertilizacijom koji utječu na povećanje ili smanjenje emisije (preuzeto od Lampitt i sur., 2008).

Plinovi i aerosoli	**RF (W/m^2)**	**Stopa difuzije iz oceana u atmosferu (mol/yr^1)**	**Čimbenici koji utječu na povećanje ili smanjenje stope difuzije**	**Reference**
CO_2	1.6	-1.4×10^{14}	Povećano uklanjanje i protok ugljika smanjit će RF.	IPCC (2001)
metan	0.5	8.0×10^{12}	Anoksija povećava produkciju.	Houweling i sur. (2000)
halokarbonati	0.3	$>1\times10^{11}$	Intenzivna produkcija zbog veće metaboličke aktivnosti fitoplanktona. Oni koji sadrže brom i klor povećavaju RF, a oni koji sadrže jod mogu povećati koncentraciju aerosola i DMS-a (povećati albedo) i tako smanjiti RF.	Harper (2000), Quack i Wallace (2003) i Smythe-Wright i sur. (2006).
ozon	0.3		Povećana koncentracija halokarbonata reducirati će stratosferski ozon (oznoski omotač) i povećati RF, a redukcija troposferskog zona smanjiti će RF.	Solomon i sur. (1994), Dvortsov i sur. (1999) i Vogt i sur. (1999)
dušikovi oksidi	0.1	1.2×10^{11}	Povećanjem biološke produkcije fitoplanktona povećava se RF.	Jin i Gruber (2003)
aerosol	−0.5	3.3×10^{15} (g/yr^1)	Povećani unos morske soli u atmosferu povećava produkciju aerosola i smanjuje RF.	IPCC (2001)
DMS (albedo)	−0.7	6.9×10^{11}		

4.1.4. MODIFIKACIJA GLOBALNE RAVNOTEŽE MAKRONUTRIJENATA I ŽELJEZA

Fertilizacija oceana željezom dovodi do preraspodjele makronutrijenata poput fosfora i nitrata. U kontekstu neželjenih posljedica, fertilizacija određenog oceanskog područja, primjerice oko Antarktike, desetljećima ili stoljećima kasnije može uzrokovati redukciju primarne produkcije u udaljenijem području kao naprimjer oko ekvatora. Takav scenarij bi bio posljedica nestanka nutrijenata u oceanu oko Antarktike zbog čega bi alohtoni izvor nutrijenata (iz drugog ekosustava) postao ekvator (Lampitt i sur., 2008). Tada bi ribarstvo i ekonomija država ekvatorijalnog područja postali ugroženi (Sarmiento i Gruber, 2002).

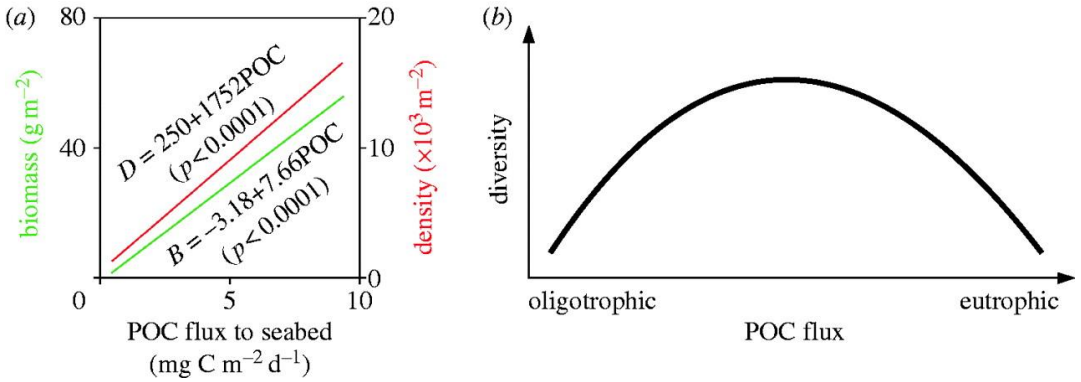
Ipak, preraspodjela nutrijenata može biti pozitivna za druga područja oceana. Fertilizacijom se povećava biomasa fitoplanktona koji tone i remineralizira se pa duboko more postaje obogaćeno nutrijentima. Izdizanjem nutrijentima obogaćene vode na površinu udaljenijih, nutrijentima siromašnih područja može se potaknuti primarna produkcija i uklanjanje ugljika na udaljenijim područjima (Williamson i sur., 2012).

Osim makronutrijenata i željezo se potencijalno može redistribuirati u oceanskom području pa postoji mogućnost da se zbog dodavanja željeza u jednom području smanji njegova koncentracija u drugom. Ipak, procijenjeno je da koncentracija antropogeno dodanog željeza (10 000 tona godišnje) iznosi 0.1% od količine željeza dovedene u ocean atmosferskom prašinom (15,5 x 10^6 tona godišnje) i rijekama (650 x 10^6 tona godišnje) stoga fertilizacija oceana ne može značajno utjecati na globalnu raspodjelu željeza u oceanu (Lampitt i sur., 2008).

4.1.5. PROMJENA STRUKTURE BIOCENOZA PELAGIJALA I BENTOSA

Glavni uzrok strukturalnih promjena zajednica pelagijala i bentosa je promjena u omjeru nutrijenata (N:P:Si) nakon fertilizacije. Direktna posljedica je promjena biološke pumpe zbog drugačijeg načina transporta POC u dubine zbog kemijskih (promjena Redfieldovog omjera) i morfoloških promjena morskog snijega i fekalnih peleta. Indirektne posljedice mogu se očitovati u ribarstvu, gospodarskoj grani od koje zavisi 1,3 milijarde ljudi na Zemlji. Primjerice, fertilizacija može potaknuti dominaciju štetnih vrsta u fitoplanktonu poput *Phaeocystis antarctica* (zabilježeno tijekom CROZEX projekta (Lucas i sur, 2007) koja može uzrokovati eutrofikaciju jer proizvodi puno organske tvari. Njome se mezozooplankton ne hrani koji postupno nestaje, a to direktno utječe na gustoću populacije riba. Vrlo je važno da se adekvatnim modelima predvidi rizik ostvarenja ovakvog efekta fertilizacije.

0,46 tona ugljika godišnje dođe do abisalnog dna (Jahnke 1996), od toga 96% se razgradi ili remineralizira u DIC (eng. *dissolved inorganic carbon*), a ostalih 4% ostaje zarobljeno u sedimentu kao uklonjeni ugljik (Tyson 1995). Na količinu zarobljenog ugljika u sedimentu utječe biomasa abisalne zajednice i biološki procesi koje provode, stoga je važno razmotriti kakav utjecaj fertilizacija ima na nju. Kvantitativna ili kvalitativna promjena u toku ugljika uzrokuje strukturalnu promjenu abisalne zajednice te mijenja funkcioniranje njihovog ekosustava. U oligotrofnim područjima fertilizacija će dovesti do povećanja biomase i bioraznolikosti zajednice abisala, a u eutrofnim područjima je suprotno zbog pojave eutrofikacije i hipoksije. Stoga odgovor zajednice bentosa na povećanje organskog ugljika ovisi o karakteristikama okoliša u kojem se prvotno nalaze (Slika 3.) i o kemijskoj strukturi POC-a (Billet i sur, 2001). Eksperimenti fertilizacije predloženi su u oligotrofnim područjima zbog manjeg rizika pojave eutrofikacije i anoksije (Lampitt i sur., 2008).

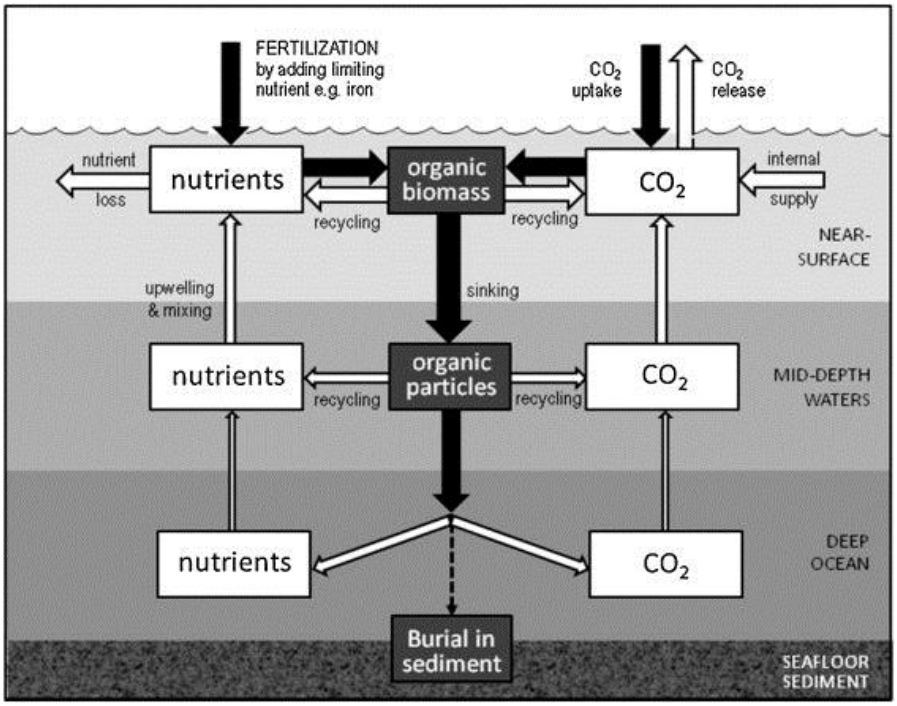


Slika 3. (a) Ovisnost biomase i gustoće dubokomorskog makrobentosa zapadnog Sjevernog Atlantika o procijenjenom POC toku (prilagođeno prema Johnson i sur, 2007) (b) Promjena bioraznolikosti abisalne zajednice s obzirom na količinu POC-a koji tone i trofiju okoliša u kojem se nalazi (preuzeto od Lampitt i sur., 2008).

4.2. EFIKASNOST METODE

Efikasnost metode fertilizacije oceana željezom izražava se kao omjer dodane količine željeza na količinu uspješno izdvojenog ugljika (minimalno 100 godina) (de Baar i sur., 2008). Ovisi o stopi uklanjanja ugljika (eng. *carbon export ratio*) i udjelu ugljika koji difundira iz atmosfere (eng. *atmospheric uptake efficiency*). Stopa uklanjanja ugljika se izražava kao količina nutrijenata dodana u površinski sloj vode na količinu ugljika koji tone u duboko more. Na stopu utječe kemija nutrijenta jer određuje koliko će se brzo adsorbirati na druge tvari i postati nepristupačan za fitoplankton, zatim stopa grazinga i brzina tonjenja čestica. Brži izvoz (protok) ugljika dosegnuti će dublje slojeve mora prije remineralizacije pa

će ugljikov dioksid u takvom okolišu (stalna temperatura, slaba cirkulacija i miješanje vodenog stupca) ostati zarobljen više stoljeća nego primjerice u mezopelagijalu gdje će se zadržati od nekoliko godina do desetljeća. Ako remineralizacija započne u mezopelagijalu, ubrzo će se povećati parcijalni tlak CO_2 u eufotičkoj zoni i stvoriti protuučinak te emitirati CO_2 nazad u atmosferu (Slika 4.). Udio dodanog ugljika difuzijom iz atmosfere ovisiti će o čimbenicima koji utječu na brzinu izmjene plinova između površine mora i sloja zraka (vjetar i valovi) te o brzini remineralizacije CO_2 iz POC koja utječe na brzinu recikliranja CO_2 i njegov parcijalni tlak u površinskom sloju koji ubrzava difuziju CO_2 iz atmosfere (Smetacek i Naqvi, 2008).



Slika 4. Procesi koji utječu na efikasnost sekvestracije ugljika tijekom fertilizacije oceana limitirajućim nutrijentom, primjerice željezom. Pune strelice predstavljaju primarne procese koji povećavaju efikasnost sekvestracije ugljika. Otvorene strelice: sekundarni procesi koji bi mogli stvoriti protuučinak i smanjiti efikasnost sekvestracije. Deblje strelice predstavljaju brze procese koji traju danima do mjesecima, a tanje sporije procese koji traju godinama i stoljećima (preuzeto od Williamson i sur., 2012).

Uzimajući u obzir ova dva čimbenika može se procijeniti efikasnost fertilizacije oceana željezom kao metode uklanjanja ugljika. Najbolji mogući scenarij prema autorima Aumont i Bopp (2006) te Zahariev i sur. (2008) jest uklanjanje 25-75 gigatona (Gt) ugljika u vremenskom periodu od 100 godina. Najveći udio u izdvajanju ove količine ugljika imao bi Južni Ocean. S obzirom na procjenu emisije od 900 do 2000 Gt ugljika gorenjem fosilnih

goriva za taj period, smatra se da bi rezultat geoinženjeringa bio nedovoljan za ublažavanje predviđenih klimatskih promjena (Williamson i sur., 2012).

Uvjet koji utvrđuje uspješnost fertilizacije oceana kao metode uklanjanja ugljika jest samoodrživost fertilizirane vodene mase tijekom dugog vremenskog perioda (više stoljeća). Duboka vodena masa koja ima visoku koncentraciju CO_2 uklonjenog iz atmosfere će se, nakon dužeg razdoblja, vratiti na površinu mora te u toj vodenoj masi uzrokovati povišeni parcijalni tlak CO_2 što može uzrokovati njegovu difuziju nazad u atmosferu. No, ako je vraćena duboka voda bila obogaćena i recikliranim limitirajućim nutrijentom, moguće je da se ponovno pokrene ciklus primarne produkcije i asimilacije oslobođenog CO_2 u biomasu koja opet tone. Tada je sustav samoodrživ jer se davno uklonjeni ugljik i dalje zadržava odvojenim od atmosfere. Ipak, željezo je vrlo reaktivan element koji se brzo veže u sediment i malo je vjerojatno da bi se kompletno antropogeno dodano željezo remineraliziralo u duboku vodu i njenim izdizanjem dovelo do površinske eufotičke zone. Stoga je vrlo vjerojatno da se veliki udio uklonjenog CO_2 vrati u atmosferu zbog odsutnosti potrebne količine željeza za ponovni ciklus primarne produkcije koji bi zadržao ugljik u morskom ekosustavu (Williamson i sur., 2012).

Potrebno je uključiti i ekonomsku komponentu kako bi metoda imala komercijalni potencijal, odnosno predlaže se što manja količina željeza na količinu uklonjenog ugljika kako bi metoda bila ekonomski isplativa i izvediva. Treba uzeti u obzir da se željezo zbog svojih kemijskih značajki brzo gubi iz eufotičke zone koju u kratkom vremenskom roku treba ponovno obogatiti željezom, odnosno eksperimenti bi zahtijevali odlaganje određene količine željeza više puta na istom području (Williamson i sur., 2012).

5. PRIJEDLOZI ZA POBOLJŠANJE METODE

Efikasnost fertilizacije oceana željezom i utjecaj metode na ekosustav još uvijek nije dovoljno istražen. Potrebna su duža i konkretnija terenska istraživanja. Uglavnom su se svi eksperimenti provodili sa ciljem dokazivanja željeza kao limitirajućeg nutrijenta i njegove uloge u cvjetanju fitoplanktona, dok uklanjanje ugljika nije bilo u fokusu istraživanja. Potrebno je istraživanje koje će se baviti isključivo protokom ugljika i njegovom parametarizacijom. Istraživanja bi trebala trajati duže kako bi se postiglo bolje razumijevanje reakcije ekosustava na dodatak željeza. Također, potrebno je razvijanje boljih matematičkih modela biogeokemijskih procesa u oceanu kako bi se bolje razumjele interakcije kemijskih,

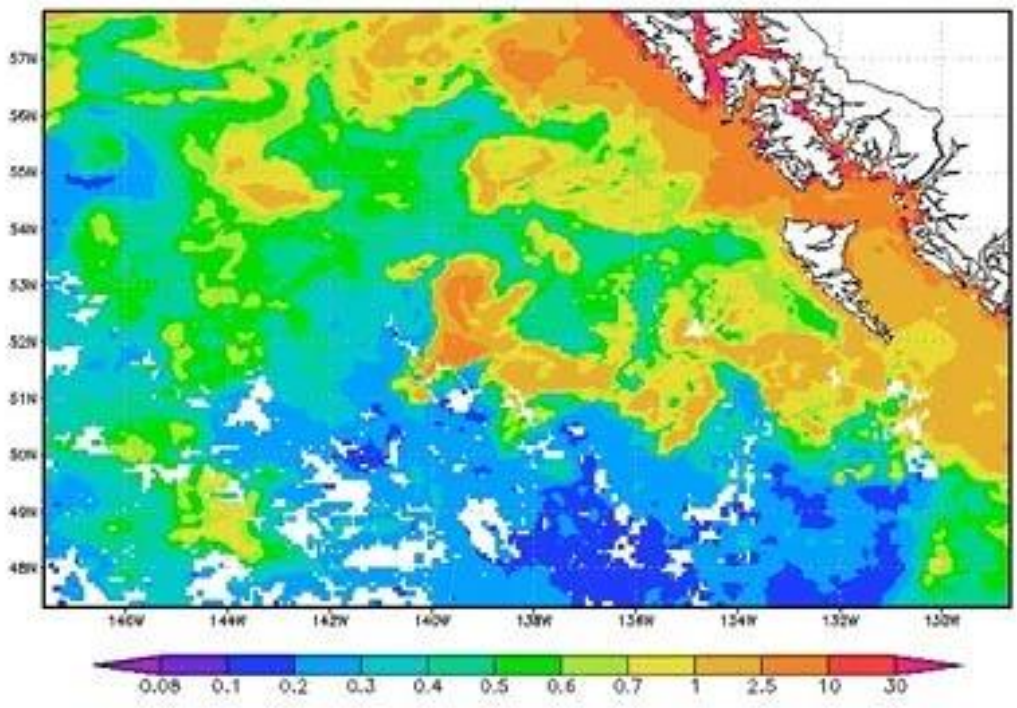
fizičkih i bioloških procesa. Modeli su potrebni za pravilnu interpertaciju podataka dobivenih na terenskom istraživaju i za predviđanje ostvarenja mogućih neželjenih efekata fertilizacije čime se onda može dokazati efikasnost metode i zaključiti da li je ima smisla provoditi (Lampitt i sur., 2008).

6. PRAVNO UREĐENJE

Obzirom na rizike fertilizacije na morski ekosustav koji imaju ekonomski i sociološki utjecaj, 2007. godine pokrenut je postupak pravnog uređenja provedbe eksperimenata fertilizacije oceana željezom. U postupku pravnog uređenja sudjelovala su četiri tijela UN-a: Meuđuvladina oceanografska komisija (*Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO* (IOC)), Konvencija o bioraznolikosti (*Convention on Biological Diversity* (CBD)), Londonska konvencija/Londonski protokol (*London Convention/London protocol* (LC/LP) i Konvencija Ujedinjenih naroda o pravu mora (*UN Convention on Law of the Sea* (UNCLOS)). Znanstvene grupe LC/LP donijele su relevantni pravni propis u čijim odredbama se nalaze početci pravnog uređenja postupka fertilizacije oceana (*"Statement of Concern"*). 2008. godine zaključeno je da se, obzirom na znanje o odgovoru ekosustava na fertilizaciju, zabrani komercijalni pristup metodi i dopuste jedino eksperimenti koji će omogućiti nove podatke za bolje razumijevanje utjecaja fertilizacije na ocean, a koji se provode unutar pravnih okvira propisanih Konvencijom i Protokolom. 2010. godine vodeća tijela Londonske konvencije i protokola usvojila su točno određeni okvir rada prilikom provođenja eksperimenata fertilizacije oceana kojim ih se usklađuje sa Londonskom konvencijom/Londonskim protokolom (*Ocean Fertilisation Assessment Framework*). U međuvremenu, na konferenciji članica CBD-a, zatraženo je od država članica, da se u skladu s važećim propisima, eksperimenti fertilizacije ne provode dok se ne postigne dovoljno jaka baza znanstveno dobivenih podataka na temelju koje bi se mogli pravilno ustvrditi rizici provođenja metoda s obzirom na njezinu efikasnost. 2010. godine Međuvladina oceanografska komisija uvodi mjere predostrožnosti (*precautionary principle*) kojima se nastoji postići pravna sigurnost, postavljajući jasne granice unutar kojih je moguće provođenje postupka fertilizacije oceana (Williamson i sur., 2012).

6.1. ILEGALNI EKSPERIMENT FERTILIZACIJE OCEANA ŽELJEZOM

Russ George je američki poduzetnik i bivši izvršni direktor kompanije Planktos koja promovira fertilizaciju oceana. U srpnju 2012. godine je sa grupom znanstvenika unio 100 tona željeza sa ribarskog broda u Sjeverni Pacifik zapadno od otočja Haida Gwaii. Lokalni stanovnici su bili uvjereni da će fertilizacija potaknuti razvoj ribljeg fonda te nisu bili upoznati sa mogućim lošim posljedicama na morski ekosustav. Također, obećano im je financiranje projekta za restauraciju populacije lososa u području otočja, a izvršnim direktorom osnovane kompanije za provedbu projekta imenovan je Russ George. Ovaj postupak komercijalne fertilizacije velikog područja oceana prekršio je pravne okvire određene na konferenciji članica CBD-a i Londonskom konvencijom/Londonskim protokolom kojima je zabranjen komercijalan pristup fertilizaciji oceana. Mjesec dana nakon fertilizacije došlo je do cvjetanja fitoplanktona što je vidljivo na slici (Slika 5.), a Russ George također tvrdi da su skupljeni znanstveni podaci i da je nad područjem koje je tretirano izvršen monitoring (https://www.theguardian.com/environment/2012/oct/15/pacific-iron-fertilisation-geoengineering). AGETC (eng. *Action Group on Erosion, Technology and Concentration*) međunarodna grupa provela je istraživanje njegovog projekta te je utvrđeno da je svojim aktivnostima prekršio najmanje tri internacionalna moratorija (http://www.etcgroup.org/content/full-press-coverage-2012-ocean-fertilization-scheme-near-haida-gwaii). 2013. godine Russ George otpušten je sa mjesta izvršnog direktora korporacije za restauraciju lososa otočja Haidi. U listopadu 2012. godine sazvana je konferencija članica UN-a i CBD-a u Hyderbadu u Indiji gdje je predloženo unaprijeđenje moratorijuma na geoinženjering kako bi se onemogućile komercijalne provedbe metoda u geoinženjeringu poput fertilizacije oceana dok se ne osigura dovoljno znanstvenih istraživanja koja će u budućnosti možda potvrditi da je fertilizacija oceana efikasna i niskorizična metoda za morski ekosustav (https://www.theguardian.com/environment/2012/oct/15/pacific-iron-fertilisation-geoengineering).



Slika 5. Cvjetanje fitoplanktona na području od 10 000km^2 Sjevernog Pacifika na zapadnoj obali Kanade u kolovozu 2012. godine. Žuto i smeđe obojenje predstavlja vrlo visoke koncentracije pigmenta klorofila a. (Preuzeto sa: https://www.theguardian.com/environment/2012/oct/15/pacific-iron-fertilisation-geoengineering)

7. ZAKLJUČAK

Fertilizacija oceana željezom je potencijalno uspješna metoda geoinženjeringa. Provedeni eksperimenti pokazali su da se dodavanjem limitirajućeg nutrijenta poput željeza u deficijentna područja oceana pospješuje primarna produkcija. Koncept metode je dobar jer se pospješuje već postojeći prirodni proces, biološka pumpa, i time odvaja suvišan ugljikov dioksid iz atmosfere. Ipak, ako se želi ostvariti svrha ove metode, a to je smanjenje klimatskih promjena uzrokovanih globalnim zatopljenjem, potrebno je razmišljati o tome kako će fertilizirani ekosustav funkcionirati stoljećima nakon što se fertilizacija provede. Fertilizirani morski ekosustav, bez obzira na promjene koje se dogode u njemu nakon fertilizacije, mora biti samoodrživ u budućnosti, odnosno sav ugljikov dioksid zadržan u dubokim vodama i sedimentu treba ostati zauvijek odvojen od atmosfere. Znači, ako se erupcijama vulkana ugljikov dioksid iz sedimenta vrati u atmosferu ili ako duboka voda izdizanjem vrati sav ugljikov dioksid nazad na površinu, potreban je mehanizam koji će istu koncentraciju ugljikovog doksida vratiti u proces ponovnog uklanjanja.

Williamson i sur. (2012) su predložili mogućnost izdizanja duboke vode bogate ugljikovim dioksidom i potpuno recikliranim nutrijentom koji podržava njegovo iskorištavanja i uklanjanje. Ipak, skeptični su u slučaju fertilizacije željezom iz razloga što je željezo reaktivan element koji se brzo veže u sedimentima te se ne bi mogao u potpunosti reciklirati iz biomase. Stoga, na površinu bi se nakon puno stoljeća vratio odvojeni CO_2, ali ne i željezo u jednakoj koncentraciji u kojoj je dodano i tako se ne bi omogućio početak novog ciklusa uklanjanja iste količine CO_2. Također, predviđa se uklanjanje relativno malog postotka ugljika u odnosu na njegovu emisiju izgaranjem fosilnih goriva.

Obzirom na navedene činjenice, fertilizacija oceana željezom se još ne može smatrati efikasnom metodom geoinženjeringa, ali postoji određeni potencijal da to postane. Potrebna su dodatna istraživanja bioloških, kemijskih i fizičkih interakcija unutar morskog ekosustava kako bi se došlo do inovativnih rješenja koja bi omogućila veću efikasnost metode u smislu ostvarenja većeg postotka uklonjenog ugljika s obzirom na izdvojeni ugljikov dioksid iz atmosfere. Osim toga, izuzetno je važno razvijati matematičke modele kojima će se moći predvidjeti rizik vraćanja izdvojenog ugljika nazad u atmosferu u dalekoj budućnosti. Iako se ne može sa sigurnošću reći da će se ovom metodom ikada moći ukloniti dovoljno ugljikovog dioksida, uvijek se možemo fokusirati na ostale moguće metode u geoinženjeringu te njihovim kombiniranim primjenama ostvariti ideju oceana kao alata kojim se ugljikov dioksid, oslobođen fosilnim izgaranjem, može vratiti natrag u sediment.

8. LITERATURA

Aumont , O., Bopp, L., 2006. Globalizing results from ocean *in situ* iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles* **20** (GB2017).

Agawin, N.S.R., Hale, M.S., Rivkin, R.B., Matthews, P., Li, W.K.W., 2006. Microbial response to a mesoscale iron enrichment in the NE subarctic Pacific: bacterial community composition. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **53**, pp. 2248-2267.

Behrenfeld, M.J., Bale, A.J., Kolber, Z.S., Aiken, J., Falkowski, P.G., 1996. Confirmation of iron limitation of phytoplankton photosynthesis in the equatorial Pacific Ocean. *Nature* **383**, pp. 508-511.

Boyd, P.W., 2002. The role of iron in the biogeochemistry of the Southern Ocean and equatorial Pacific: a comparison. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **49**, pp. 1803-1821.

Boyd, P.W., Jickells, T., Law, C.S., Blain, S., Boyle, E.A., Buesseler, K.O., Coale, K.H., Cullen, J.J, i sur., 2007. Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: synthesis and future directions. *Science* **315**, pp. 612-617.

de Baar, H. 2005. Synthesis of iron fertilization experiments: From the Iron Age in the Age of Enlightenment.*Journal of Geophysical Research*, **110** (C9).

de Baar, H.J.W., Gerringa, L.J.A., Laan, P., Timmermans, K.R., 2008. Efficiency of carbon removal per added iron in ocean iron fertilization. *Marine Ecology Progress Series* **364**, pp. 269-282.

Dvortsov, V.L., Geller, M.A., Solomon, S., Schauffler, S.M., Atlas, E.I., Blake, D.R. 1999 Rethinking reactive halogen budgets in the midlatitude lower stratosphere. *Geophysical Research Letters* **26**, pp. 1699-1702

Filipčić, Anita. Dr. Feletar, 1996. Klimatologija u nastavi geografije,

Haigh, J. 2002. Radiative forcing of climate change.*Weather* **57**, pp. 278-283.

Hale, M.S., Rivkin, R.B., Matthews, P., Agawin, N.S.R., Li, W.K.W., The NE subarctic Pacific: heterotrophic bacterial processes. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* **53**, pp. 2231-2247.

Harper, D., 2000 The global chloromethane cycle: biosynthesis, biodegradation and metabolic role. *Natural Product Reports* **17**, pp. 337-348.

Houweling, S., Dentener, F., Lelieveld, J., Walter, B., Dlugokencky, E. 2000 The modeling of tropospheric methane: how well can point measurements be reproduced by a global model? *Journal of Geophysical Research* **105**, pp. 8981-9002.

IPCC 2001 *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Jahnke, R. A. 1996 The global ocean flux of particulate organic carbon: areal distribution and magnitude. *Global Biogeochemical Cycles* **10**, pp. 71-88.

Jin, X., Gruber, N., 2003. Offseting the radiative benefit of ocean iron fertilization by enhancing N_2O emissions. *Geophysical Research Letters* **30**, pp. 2249-2252,

Johnson, K. S., R. M. Gordon, K. H. Coale. 1997. What controls dissolved iron in the world ocean? *Marine Chemistry* **57**, pp. 137-161.

Johnson, N. A., Campbell, J. W., Moore, T.S., Rex, M.A., Etter, R. J., McClain, C.R. Dowell, M.D. 2007 The relationship between the standing stock of deep-sea macrobenthos and surface production in the western North Atlantic. *Deep-Sea Research Part I* **54**, pp. 1350-1360.

Keller, M., D., Bellows, W., K., Guillard R., R., L. 1989 Dimethyl sulfide production in marine phytoplankton. *Biogenic Sulfur in the Environment* **393**, pp. 167-182.

Kudo, I., Noiri, Y., Cochlan, W.P., Suzuki, K., Aramaki, T., Ono, T., Nojiri, Y., 2009. Primary productivity, bacterial productivity and nitrogen uptake in response to iron enrichment during the SEEDS II. *Deep-Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography* **56**, pp. 2755-2766.

Lampitt, R., Achterberg, E., Anderson, T., Hughes, J., Iglesias-Rodriguez, M., Kelly-Gerreyn, B., Lucas, M., Popova, E., Sanders, R., Shepherd, J., Smythe-Wright, D. Yool, A. 2008. Ocean fertilization: a potential means of geoengineering?*Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **366** , pp. 3919-3945.

Lucas., M., Seeyave, S., Sanders, R., Moore, C.M., Williamson, R., Stinchcombe, M. 2007. Nitrogen uptake responses to a naturally Fe-fertilised phytoplankton bloom during the 2004/2005 CROZEX study. *Deep-Sea Research Part II* **54**, pp. 2138-2173.

Martin, J. H., Fitzwater, S. E. 1988. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, **331**, pp. 341-343.

Sarmiento, J., L. Gruber, N., 2002. Sinks for anthropogenic carbon. *Physics Today* **55**, pp. 30-36.

Smetacek, V. Naqvi, S. 2008. The next generation of iron fertilization experiments in the Southern Ocean.*Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **366**, pp. 3947-3967.

Solomon, S., Garcia, R. R. Ravishankara, A.R. 1994. On the role of iodine in ozone depletion. *Journal of Geophysical Research* **99**, pp. 20 491-20 499.

Street, JH., Paytan, A. 2005. Iron, phytoplankton growth and the carbon cycle. *Metal Ions in Biological Systems* **43**, pp. 153-93.

Tollefson, J. 2017. Iron-dumping ocean experiment sparks controversy. *Nature* **545**, pp. 393-394.

Tyson, R.V. 1995. London, UK: Chapman and Hall. Sedimentary Organic Matter: Organic facies and palynofacies.

Vogt, R., Sander, R., Glasow, R. V., Crutzen, P. J. 1999. Iodine chemistry and its role in halogen activation and ozone loss in the marine boundary layer: a model study. *Journal of Atmospheric Chemistry* **32**, pp. 375-395.

Williamson, P., Wallace, D., Law, C., Boyd, P., Collos, Y., Croot, P., Denman, K., Riebesell, U., Takeda, S.,Vivian, C. 2012. Ocean fertilization for geoengineering: A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Safety and Environmental Protection* **90**, pp. 475-488.

Zahariev, K., Christian, J., Denman, K., 2008. Preindustrial, historical and fertilization simulations using a global ocean carbon model with new parameterizations of iron limitation, calcification and N_2 fixation. *Progress in Oceanography* **77**, pp. 56-82.

http://www.mbari.org/science/upper-ocean-systems/chemical-sensor-group/periodic-table-of-elements-in-the-ocean/ (Preuzeto: 20.08.2017.)

https://www.theguardian.com/environment/2012/oct/15/pacific-iron-fertilisation-geoengineering (Preuzeto: 05.09.2017.)

9. SAŽETAK

Geoinženjering je ljudska intervencija u prirodne procese kojom se nastoje ukloniti/ublažiti posljedice klimatskih promjena. Jedna od potencijalnih metoda geoinženjeringa je fertilizacija oceana željezom. Metoda uključuje dodavanje željeznih spojeva u HNLC oceanska područja gdje je rast fitoplanktona ograničen upravo tim elementom, čime se nastoji potaknuti primarna proizvodnja i biološka pumpa te posljedično smanjiti količina ugljikovog dioksida u atmosferi.

U radu je definiran geoinženjering, moguća provedba te ciljevi koji se tim metodama žele ostvariti. Opisani su eksperimenti fertilizacije oceana željezom te kemijska svojstva željeza, njegova distribucija u oceanu i uloga u fitoplanktonu, bitni čimbenici koje je potrebno proučiti za uspjeh ove metode. Predstavljeni su neželjeni učinci koje fertilizacije oceana može uzrokovati, prijedlozi za poboljšanje efikasnosti metode, važnost predviđanja rizika vraćanja odvojenog CO_2 u atmosferu te razvijanja pravno određenih radnih okvira koji osiguravaju da se fertilizacija oceana željezom provodi u kontroliranim uvjetima.

10. SUMMARY

Geoengineering is a deliberate human intervention in the ecosystem processes in order to counteract anthropogenic climate change. Ocean iron fertilization as a potential method in geoengineering is suggested. Method is based on addition of iron compounds to HNLC oceanic regions where primary production is limited by iron, making primary production and biological pump more intense, thereby reducing the concentration of carbon dioxide in atmosphere.

In this work we present the definiton of geoengineering, main goals and proposed approaches. Iron fertilization experiments are described as well as chemical properties, distribution in the ocean and role of iron in phytoplankton community, all which are important for understanding the method. Side effects and efficiency of method are described. We present importance of developing models that can predict risks of implementing the method and importance of developing acceptable framework for research on ocean iron fertilization.