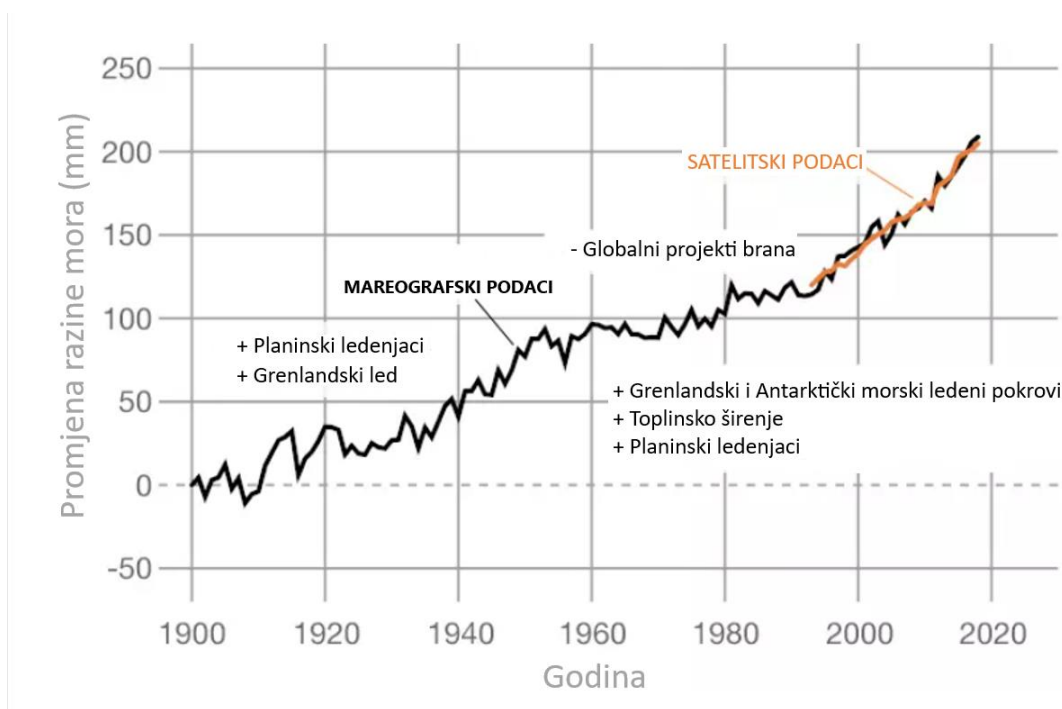


Utjecaj pojačanog učinka staklenika na mora i oceane

Kada je riječ o današnjim klimatskim promjenama, jedno od najčešće spomenutih posljedica jest povećanje razine mora. Povećanje razine mora predstavlja veliki izazov velikom dijelu svjetskog stanovništva budući da čak 10% svjetskog stanovništva živi na obalnim područjima nadmorske visine manje od 10 m, dok oko 40% svjetskog stanovništva živi unutar 100 km od obale.

Od početka 20. stoljeća globalna razina mora povećala se za oko 20 cm od čega je 5 cm u zadnjih 20 godina. Povećanje razine mora uzrokovano je otapanjem ledenjaka i toplinskim širenjem oceana. Oba razloga posljedice su globalnog zagrijavanja. Povećanje razine mora predstavlja prijetnje poput poplava obalnih područja, erozije obala te povećanje koncentracije soli u ekosustavima uz obale što dovodi do narušavanja ravnoteže ekosustava, ali i kontaminacije pitke vode.

Osim učinaka vezanih uz povećanje razine mora, primjećuju se i učinci povezani sa smanjenjem pH vrijednosti, odnosno acidifikacijom oceana te promjene u oceanskoj cirkulaciji.

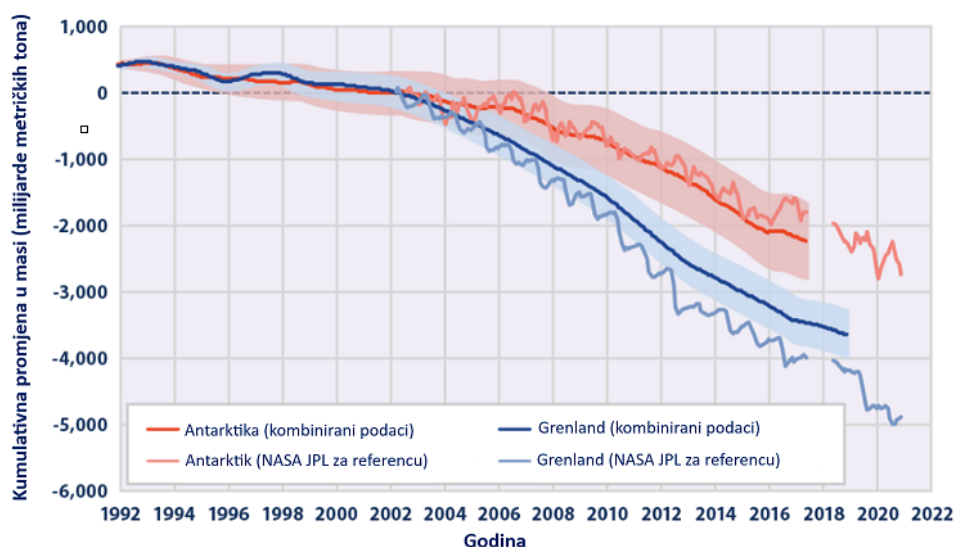


Slika 10.1 Promjena razine mora od 1900. do 2018. godine. Rezultati dobiveni kombinacijom podataka mareografa (eng. tide gauge data) i satelitskih mjerenja. Plusevi (+) su faktori koji doprinose povećanju, a minusi (-) doprinose smanjenju razine mora, a prikladno su postavljani na vremenskoj osi. (izvor: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>)

Posljedice otapanja velikih ledenih tijela na Zemlji

Na Zemlji postoje različiti oblici zaleđenih tijela i područja koja su stalno pod ledom poput zaleđenih mora, jezera, permafrosta, ledenjaka i ledenih pokrivača. Vrlo male temperaturne promjene mogu uzrokovati promjenu iz čvrstog (led) stanja u tekuće.

Ledeni pokrivači su zaleđena tijela koja prekrivaju velika područja Grenlanda i Antartike i prisutni su tijekom cijele godine. Ledeni pokrivač Grenlanda je u prosjeku dubok preko 1,6 km, dok je ledeni pokrivač Antartike dubok i do 4,8 km na nekim mjestima. Ta dva ledena pokrivača ukupno sadrže skoro 70% svjetske pitke vode. Tijekom godine zbog varijacija temperature i padaline prisutne su fluktuacije ledenih pokrivača pa se dio otopljen tijekom proljeća i ljeta nadomjesti novim snijegom preko zime. Međutim, veće temperature zraka uzrokuju brže otapanje leda te otjecanje u mora. Neki rubni dijelovi pokrivača uronjeni su u more. Temperatura mora u blizini ledenjaka vrlo je niska (blizu nule). Voda otopljenog ledenjaka koja otječe u more je hladna i slatka (sadrži manje otopljenih tvari nego slana morska voda) pa se pri ulasku u ocean s dna podiže prema gore pri čemu sa sobom povlači topliju i slanu vodu. Ta cirkulacije vode uz tijelo ledenjaka omogućuje da se ledenjak brže topi odozdo. To u konačnici dovodi do odvajanja rubnih dijelova ledenog pokrivača.



Slika 10.1.1 Kumulativna promjena u masi ledenih pokrivača Grenlanda i Antarktike. Tamnije linije dobivene su kombinacijom 20 različitih studija, a osjenčano područje prikazuje procjene nepouzdanosti. "NASA JPL" linije prikazuju rezultate jedne analize uključujući sezonske varijacije. (izvor <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-ice-sheets>.)

Otapanje kopnenog leda utječe na podizanje razine mora, dok otapanje leda koji se već nalazi u moru ne utječe na podizanje razine mora direktno. To možemo objasniti na primjeru dvije čaše s ledom. Zamislimo da se u jednoj čaši do vrha napunjenoj nalazi mješavina vode i leda, a u drugoj čaši samo voda. Otapanje leda iz prve čaše neće uzrokovati prelijevanje vode iz čaše jer se led već nalazio u čaši.

Dodamo li led u drugu čašu koja je već napunjena do vrha, voda će se preliti preko vrha. Ista analogija vrijedi za led koji se već nalazi u moru i led na kopnu – prelaskom leda s kopna u more (odvaljivanjem dijelova ledenjaka ili otapanjem planinskih ledenjaka) podiže se razina mora, dok otapanje leda koji se već nalazi u moru ne utječe na podizanje razine mora. Međutim, pokazalo se da neke plutajuće ledene platforme imaju ulogu u usporavanju otjecanja leda s kopna (primjerice Antartike) u more pa otapanjem takvog leda se ubrzava i otjecanje leda s ledenih pokrivača.

Osim ledenih pokrivača karakterističnih za Grenland i Antartiku, na podizanje razine mora utječe i otapanje planinskih ledenjaka. Ledenjaci su velika ledena tijela nastala akumuliranjem snijega tijekom mnogo godina na područjima gdje se snijega više skuplja nego otapa, a izvor su pitke vode mnogim zajednicama na Zemlji. Ledenjaci polako putuju poput jako sporih rijeka te se uslijed gibanja događaju gubitci mase zbog odranjanja i otapanja ledenjaka. Ledenjak koji masu izgubljenju otapanjem ili odranjanjem nadomješta novim snijegom je u ravnoteži.

Iako pojedinačno ledenjaci imaju značajno manju masu od ledenih pokrivača, otapanje ledenjaka događa se brže nego otapanje ledenih pokrivača te je ukupni doprinos podizanju razine mora otapanjem ledenih pokrivača i ledenjaka otprilike jednak.

Valja istaknuti još nekoliko posljedica otapanja velikih ledenih tijela osim podizanja razine mora. Ledena tijela uglavnom su bijela zbog čega imaju visok albedo. To znači da reflektiraju većinu upadnog Sunčevog zračenja natrag u Svemir što je jedan od razloga održavanja niskih temperatura na takvim područjima. Otapanjem ledenjaka i ledenih pokrivača albedo se smanjuje što znači da se više zračenja apsorbira te kasnije otpušta u obliku infracrvenih valova što uzrokuje dodatno zagrijavanje Zemlje.

Otapanje morskog leda ne doprinosi povećanju razine mora jer se taj led stvara iz morske vode (kao da bocu s vodom zamrzemo i odmrzemo – pri tome nismo dodali ni oduzeli ukupnu količinu vode u boci). Otapanjem morskog leda počinju se vidjeti tamni dijelovi oceana koji ima vrlo nizak albedo. Bolje upijanje zračenja doprinosi dodatnom zagrijavanju.

Permafrost je tlo zaleđeno duže od dvije godine koje može i ne mora biti prvi sloj tla, a može se nalaziti na kopnu ili ispod mora (iako je pod morem završilo podizanjem razine mora tijekom povijesti, a ne nastankom). Većina permafrosta Sjeverne Amerike i Sibira nastala je tijekom ledenih doba u kasnom pleistocenu (između 2,6 milijuna i 11 700 godina). U slojevima permafrosta često se nalazi metanski klatrat, odnosno velika količina metana (ali moguća je prisutnost i drugih plinova) zarobljena u ledu. Degradacijom permafrosta ogromne količine (milijuni tona) metana u atmosferu. Čak ako metanski klatrat i nije prisutan, zbog velike količine biomase u permafrostu, njenim bakterijskim razgrađivanjem nakon topljenja permafrosta ugljik može biti pretvoren u metan.

Metan je zbog svoje strukture jaki staklenički plin pa otapanje permafrosta predstavlja dodatnu prijetnju po pitanju globalnog zagrijavanja, odnosno još jedan način kojim otapanje ledene površine može utjecati na dodatno zagrijavanje, iako samo po sebi nema direktan utjecaj na podizanje razine mora.

Toplinsko istezanje oceana

Sve tvari građene su od atoma ili molekula koje neprestanu titraju oko nekog ravnotežnog položaja. Povećanjem temperature tvari povećava se amplituda tog titranja, odnosno molekule imaju više energije i titranjem se mogu sve više udaljavati jedna od druge.

Zbog toga se povećanjem temperature tvari povećava njezin volumen, a time smanjuje gustoća. Zbog globalnog zagrijavanja i velike količine topline koju ocean apsorbira toplinsko istezanje oceana uvelike je doprinijelo povećanju razine mora. Voda temperature npr. 5 °C nema jednaki porast volumena pri jednakoj promjeni temperature kao voda od 25 °C pa nemaju sva svjetska mora jednak doprinos globalnom podizanju razine mora. Iako je na godišnjoj razini utjecaj naizgled zanemariv (nekoliko milimetara godišnje), čak 1/3 od ukupnog podizanja razine mora uzrokovana je toplinskim istezanjem.

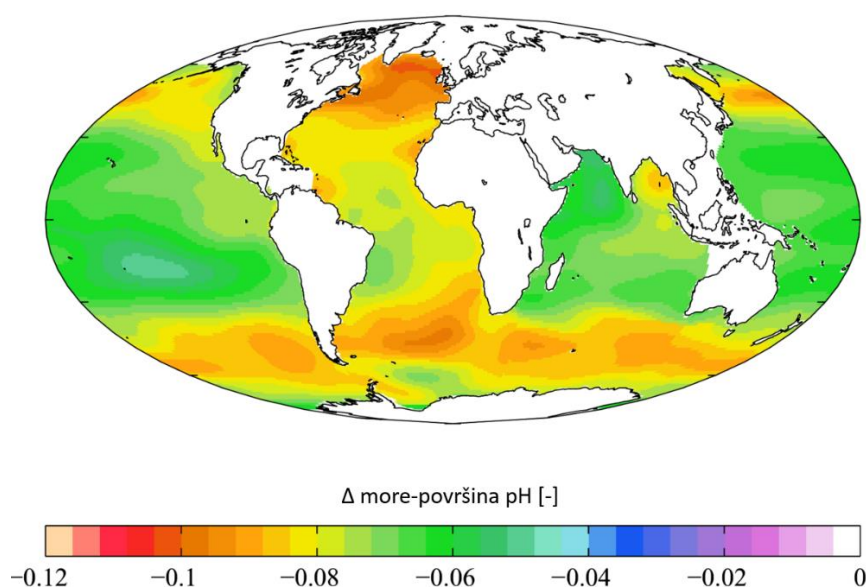
Povećanje kiselosti oceana

Osim povećanja razine mora, globalno zagrijavanje utječe i na povećanje kiselosti mora. Više od 30% ugljikovog dioksida otpuštenog u atmosferi apsorbira ocean. Povećanjem koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi povećava se i količina ugljikovog dioksida koju ocean apsorbira. Otapanjem ugljikovog dioksida u vodi nastaje ugljična kiselina (H_2CO_3). Ugljična kiselina se pak razlaže (disocira) na vodikov (H^+) i bikarbonatni ion (HCO_3^-) što možemo opisati sljedećom kemijskom jednačinom koja ide u oba smjera:



Kiselost otopine određena je relativnom koncentracijom vodikovih iona. Slobodni vodikovi ioni smanjuju pH vrijednost morske vode, odnosno povećavaju kiselost oceana. Vodikovi ioni zatim reagiraju s karbonatnim ionima (CO_3^{2-}) iz morske vode ($\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$). Karbonatni ioni bitni su za izgradnju oklopa i skeletona morskih kalcificirajućih organizama (jer su građeni od aragonita ili kalcijevog karbonata), a zbog reakcija s vodikovim ionima njihova se koncentracija u morskoj vodi smanjuje. Dakle, u morskoj vodi zbog različitih kemijskih reakcija pronalazimo ugljikov dioksid, ugljičnu kiselinu, bikarbonatne i karbonatne ione. U normalnim uvjetima njihove koncentracije su u ravnoteži, no zbog povećane koncentracije ugljikovog dioksida u atmosferi, odnosno povećane koncentracije ugljikovog dioksida koji ocean apsorbira, koncentracija karbonatnih iona koji su bitni za razne morske organizme se smanjuje, koncentracija bikarbonatnih iona se povećava. Od prije

industrijske revolucije do danas pH vrijednost oceana smanjila se s otprilike 8,25 na 8,14. Iako se pH morske vode smanjio, ona je i dalje blago lužnata. Međutim, iako smanjenje pH vrijednosti djeluje relativno maleno, skala pH vrijednosti je logaritamska što znači da promjena jedne pH jedinice vrijednosti je deseterostruka promjena u kiselosti. Osim organizama kojima su karbonati potrebni za izgradnju oklopa ili skeletona, povećanje kiselosti utječe i na druge organizme jer energiju potrebnu za rast, razvoj i razmnožavanje moraju koristiti za preživljavanje u kiselijoj okolini. Nekim organizmima poput modrozelenih algi odgovara povećana koncentracija ugljikovog dioksida u vodi. Promjene u ravnoteži oblika u kojima se ugljik nalazi dovode do poremećaja u hranidbenim lancima i ekosustavima te predstavljaju prijetnju za preživljavanje nekih morskih organizama



Slika 10.3.1 Procjena promjene pH vrijednosti oceana između 1700-ih i 1990-ih iz GLODAP-a (Global Ocean Data Analysis Project)