



UNIVERZITET U NOVOM SADU
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ
ФАКУЛТЕТ
ДЕПАРТАМЕНТ ЗА ФИЗИКУ



УПИСАВАЊЕ У ДОКУМЕНТ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	16 ОКТ 2007
ОРГАНIZЈЕД	БРОЈ
0603	9/1401

Uticaj stabilizacije CO₂ na promene srednjeg klimatskog stanja prime- nom programa MAGICC

- diplomski rad -

Mentor:
dr Milica Pavkov-Hrvojević

Kandidat:
Milica Pejak

Novi Sad, 2007.

Uticaj stabilizacije CO₂ na promene srednjeg klimatskog stanja primenom programa
MAGICC

Sadržaj

1 .Teorija gasova staklene bašte.....	4
1.1. Uvod	4
1.2. Osnovni pojmovi i koncentracije gasova staklene bašte	5
1.2.1. Efekat staklene bašte.....	6
1.2.2. Vodena para	9
1.2.3. Ugljen-dioksid (CO ₂).....	9
1.2.4. Ciklus ugljenika	11
<i>Emisija ugljenika iz fosilnih goriva</i>	<i>13</i>
1.2.5. Metan (CH ₄).....	15
1.2.6. Azotni oksid (N ₂ O)	16
1.2.7. Halougljenici.....	17
1.2.8. Ozon (O ₃).....	18
1.3 Radijativni forsing od predindustrijskog vremena	19
1.3.1. Radijativni forsing usled gasova staklene bašte	19
1.3.2. Kombinovani uticaj	21
1.3.3. Efekti zasićenja radijativnih forsinga	22
<i>Ekvivalentna koncentracija CO₂</i>	<i>24</i>
1.3.4. Potencijal globalnog zagrevanja	24
1.3.5. Izračunavanje GWP	25
2. Uloga procesa povratnih sprega	28
2.1. Povratne sprege zbog vodene pare	29
2.2. Povratne sprege zbog površinskog albeda.....	29
2.3. Povratne sprege zbog okeana	30
2.4. Povratne sprege zbog oblaka.....	38
2.5. Povratne sprege zbog vegetacije	41
2.6. Druge povratne sprege.....	42
3. Uticaji globalne promene klime na region.....	43
3.1. Reagovanja površinske temperature.....	43
3.2. Regionalni uticaj temperturnih promena	43
3.3. Rekonstrukcije iz paleoklime	45
3.4. Regionalne procene modela opšte cirkulacije	45
3.5. Izvedene promene u površinskim temperaturama.....	47
3.6. Urbana ostrva topote	50
3.7. Ostale posledice globalnog otopljavanja.....	51
3.7.1.Glečeri i ledene ploče i nivo mora.....	51
3.7.2.Golfska struja.....	51
3.7.3. Poljoprivreda i suše.....	52
4. Modeliranje klime	53
4.1 Vrste klimatskih modela.....	53
4.1.1. Model toplotnog režima.....	54
4.1.2. Model širinske raspodele temperature	55
4.1.3. Model za različite godišnja doba	57
5. IPCC scenariji emisije	59
5.1. Predviđanja srednjih globalnih temperaturu.....	61
5.2. Kjoto protokol	62



Uticaj stabilizacije CO₂ na promene srednjeg klimatskog stanja primenom programa MAGICC

5.2.1. Kratkoročno i srednjoročno ublažavanje klimatskih promena (do 2030)	63
5.3. MAGICC/SCENGEN	66
5.3.1. Uvod	67
5.3.2. CO ₂ stabilizacija.....	67
<i>Promene nivoa mora za stabilizacione scenarije</i>	68
5.3.3. Nove SCENGEN karakteristike	69
<i>Nove osmotrene baze podataka</i>	69
<i>Novi klimatski model podataka</i>	69
<i>Mogućnost provere tačnosti modela</i>	69
<i>Obrasci skaliranja</i>	69
6. Uticaj stabilizacije koncentracije CO ₂ na buduće koncentracije CO ₂ , CH ₄ ,N ₂ O, promenu srednje temperature i nivoa mora.....	71
6. 1. Parametri modela.....	71
6.1.1. Model ugljenikovog ciklusa	71
6.1.2. C-ciklus klimatske povratne spregе.....	71
6.1.3. Forsiranje aerosolima.....	71
6.1.4. Klimatska osetljivost	72
6.1.5. Model.....	72
6. 2. Analiza klimatskih posledica usled određenih promena parametara modela	72
6.2.1. Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa uključenom povratnom spregom WRE450	73
6.2.2. Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa uključenom povratnom spregom WRE750	78
6.2.3. Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa isključenom povratnom spregom NFB450	83
6.2.4. Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa isključenom povratnom spregom NFB750	88
6.2.5 Analiza rezultata	93
6.3. Zaključak	96
Literatura	97

1. Teorija gasova staklene bašte

1.1. Uvod

Učestale vremenske nepogode – ekstremne suše, kataklizmični požari, neupamćene poplave i temperaturni poremećaji zbog kojih je teško razlikovati jul od aprila – praćene su sve većim brojem opominjućih stručnih izveštaja o planetarnim klimatskim promenama i globalnom otopljavanju. Uprkos tome što sadržaj ovih izveštaja iz sezone u sezoni postaje sve mračniji (i odavno prevazilazi najcrnje prognoze malodušnijih klimatologa iz osamdesetih godina), interesovanje za efekat staklene bašte i rast temperature nije se znatno povećalo, kako među političkim i privrednim elitama tako i u javnom mnjenju širom sveta. U međuvremenu, termin globalno zagrevanje mnogima ostaje samo bezlična formulacija pridodata dugom spisku ekoloških problema, koji se tiču samo "ludih" naučnika i ekološki svesnih fanatika. Činjenica je da se klima na Zemlji ne oporavlja i da se njen zdravlje neće popraviti u dogledno vreme. Povećan sadržaj ugljen-dioksida u atmosferi, koji je počeo tokom industrijske ere sagorevanjem fosilnih goriva, izaziva podizanje srednje površinske temperature vazduha i značajne promene klime. Uz to, poslednja istraživanja atmosfere pokazuju da bi se klima mogla menjati i na većim skalamama i mnogo brže nego što je do sada bio slučaj.

Postoje brojni dokazi da čovekove aktivnosti imaju značajan uticaj na vreme i klimu. Jedan od najznačajnijih njegovih uticaja vezan je za početak razvoja poljoprivrede, a ogledao se u osvajanju površina krčenjem i uništavanjem šuma i drugog rastinja. Usled toga se povećavala brzina vetra u blizini tla, menjao režim temperature i vlažnosti, a donekle i padavina. Menjao se i režim vlažnosti tla, isparavanja i oticanja sa kopnene površine.

Rezultati istraživanja na Univerzitetu Misuri, Sent Luis u SAD, objavljeni ovog proleća (Clark, D.B. and D.A. Clark. 2006), pokazuju da bi zbog povećanih temperatura, proređene tropске šume mogле početi da u atmosferu emituju znatnu količinu ugljen-dioksida, gase staklene bašte, umesto da ga apsorbuju kao do sada. Debora Klark i njene kolege sa Univerziteta Misuri merili su godišnji rast šest vrsta drveća u starim tropskim šumama La Selva, u Kostariki, u periodu od 1984. do 2000. godine. Rast stabala i emisija ugljen-dioksida znatno su varirali, i to u korelaciji s temperaturom – tokom najtoplijih godina (1997–1998) rast stabala bio je najslabiji, a apsorpcija ugljen-dioksida umanjena, u korist emisije. Iz toga sledi zaključak da su tropске šume znatno osetljivije na rast temperature nego što se smatralo, što bi moglo da izazove povratnu spregu u podizanju temperature. Po mišljenju istraživača iz Misurija, to znači da će pluća planete u budućnosti ubrzavati efekat staklene bašte i proces globalnog otopljavanja, umesto da ga usporavaju.

Drugi vid čovekovog uticaja na klimu je navodnjavanje poljoprivrednih površina. Tim postupkom se znatno povećava potrošnja toplote na isparavanje, snižava temperatura Zemljine površine, povećava relativna vlažnost prizemnog sloja vazduha, menja bilans zračenja, smanjuje turbulentni prenos toplote i menjaju drugi klimatski uslovi. Zatim, razvoj urbanih sredina dovodi do znatnih klimatskih promena. Ove promene se ogledaju najviše u promeni režima sledećih elemenata i drugih uslova urbane sredine, kao što su:

- smanjenje albeda Zemljine površine,
- smanjenje isparavanja sa Zemljine površine,

- porast temperature zbog veštačkog oslobađanja velikih količina topote,
- smanjenje apsolutne i relativne vlažnosti,
- promena bilansa zračenja,
- porast antropogenog aerosola,
- smanjenje prozračnosti atmosfere,
- povećanje oblačnosti,
- povećanje magle i padavina
- povećanje oticanja itd.

Pomenuti uticaji čoveka na klimu imaju uglavnom lokalni karakter. Međutim, poslednjih decenija zapaženi su i oni uticaji koji dobijaju globalni karakter. Od tih uticaja posebno se ističe promena količine ugljen-dioksida u atmosferi. Povećanje potrošnje uglja, nafte i drugih materijala, koji predstavljaju izvore topote, dovelo je do povećanja ugljen-dioksida u atmosferi.

Hipoteza, koja je poslednjih godina izazvala veliku pažnju kod medija, javnosti, političara i naučnih udruženja je, da usled povećane emisije antropogeno proizvedenih gasova staklene bašte dolazi do porasta prosečnih globalnih temperatura. U cilju da se procene promene klime zbog porasta koncentracije gasova staklene bašte, koriste se različiti klimatski modeli. Pri tome posebno mesto u modeliranju klime imaju *povratne spregе (feedback mehanizmi)*. Ti mehanizmi se sastoje u tome što klimatske promene izazvane procesima u jednoj komponenti klimatskog sistema deluju i na druge komponente tog sistema, a ta međusobna dejstva se odražavaju na klimatske promene tako što ih podstiču ili prigušuju. Vremenske razmere ovih pojava kreću se u vrlo širokim granicama, od jedne do više hiljada godina. Povratnim spregama priroda teži da svaki poremećaj neutrališe i uspostavi normalno stanje. Na taj način ona ne dozvoljava da se klima jednosmerno menja u pravcu "eksplozije" klimatskog sistema koji bi funkcionisao po principu "lančane reakcije".

U ovom diplomskom radu ćemo prikazati osnovne koncepcije teorije gasova staklene bašte, razmotriti dokaze o stalnom porastu njihove koncentracije, izložiti proračune teorije/modelira nja koji ukazuju na moguće posledice do kojih bi usled toga došlo, kao i nesigurnosti u tim procenama, analizirati indikacije o uticaju globalne promene klime na region i predstaviti MAGICC program za procenu klimatskih promena izazvanih efektom "staklene bašte" i pomoću njega analizirati uticaj stabilizacije koncentracije CO₂ na buduće koncentracije CO₂, CH₄, N₂O, promenu srednje temperature i nivoa mora.

1. 2. Osnovni pojmovi i koncentracije gasova staklene bašte

Dostupni klimatski podaci pokazuju blisku zavisnost između koncentracije gasova staklene bašte u atmosferi i globalne temperature. Već 1896, veliki švedski hemičar Svante Arrhenius je nagovestio da bi se spaljivanjem dovoljno fosilnog goriva udvostručila koncentracija atmosferskog CO₂, a globalna temperatura bi se mogla povećati za 5,5 °C. Ovo nije daleko od 1,5 °C do 4,5 °C povećanja koje dobijamo današnjim kompjuterskim simulacijama izrađenim za projekat udvostručavanja količine atmosferskog CO₂. U 1995. godini svetska naučna zajednica izveštava da su promene već u toku i da se Zemlja zagrejala za 0,5 °C u to-

ku prošlog veka. U januaru 2001. godine IPCC¹ (Intergovernmental Panel for Climate Change) zvanično je izjavio da je ljudski uticaj glavni faktor današnjeg globalnog zagrevanja. Ova izjava je bila od velikog značaja pošto su se do tada čuli glasovi koji su globalno zagrevanje pripisivali Sunčevim aktivnostima, prirodnim klimatskim fluktulacijama ili hipotezama u kompjuterskim modelima.

Kvantitativna predviđanja buduće situacije su još uvek nesigurna. U 1995. godini IPCC je procenio da će se globalna temperatura vazduha na Zemlji povećati za otprilike 1 °C do 3,5 °C do 2100. godine, dok se u 2001. godini predviđeni porast temperature popeo na 1,4 °C – 5,8 °C. U najboljem slučaju osetićemo zagrevanje za 2 °C do 2100. godine, što bi trebalo biti najbrže menjanje klime koje se ikada dogodilo u poslednjih 10000 godina, u periodu u kom se razvila moderna civilizacija.

Gledano u širem smislu, efekat staklene bašte je prirodan fenomen koji se na Zemlji događao milionima godina pre nego što su ljudi počeli da sagorevaju fosilna goriva i emituju povećane količine ugljen-dioksida. Efekat staklene bašte igra presudnu ulogu u radijativnom transferu toplove – on je prirodni mehanizam kojim se zagreva atmosfera.

1.2.1. Efekat staklene bašte

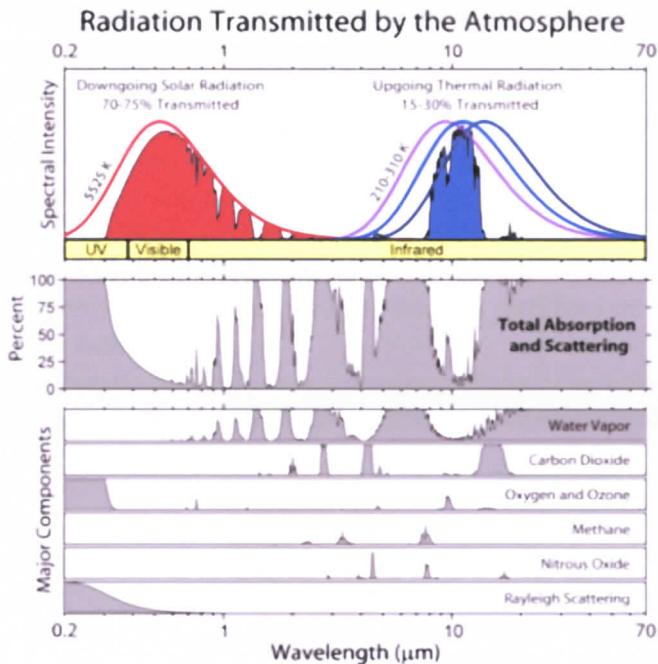
Površina Zemlje je za 34 °C viša nego što je očekivano. Da bismo razumeli razloge za ovu višu temperaturu, pomoći će nam *Wienov zakon*, koji daje talasnu dužinu na kojoj spektar crnog tela ima maksimalnu vrednost u funkciji apsolutne temperature:

$$\lambda_{\max} (\mu m) = \frac{2898}{T(K)}$$

Sunce se može predstaviti kao crno telo temperature 5800 K, tako da njegov spektar ima maksimalnu vrednost na 0,5 μm. Slika 1 prikazuje infracrveni(IR) i vidljivi deo spektra. Površina pod ovim krivama, između bilo koje dve talasne dužine, predstavlja ukupnu radijativnu energiju u nekom opsegu frekvencija. Na primer, površine ispod krive ulazne solarne radijacije direktno izvan atmosfere predstavlja gustine fluksa, tj. solarnu konstantu koja ima vrednost 1370 W/m². Treba primetiti da skoro sva ulazna solarna energija koja stiže izvan Zemljine atmosfere ima talasnu dužinu manju od 3 μm, dok izlazna energija koju ispušta Zemlja ima praktično svu svoju energiju talasne dužine veće od 3 μm. Infracrveni deo spektra započinje sa 0,7 μm i kreće se do 100 μm.

Kada zračenje energija prolazi kroz atmosferu, na njega utiču različiti gasovi i aerosoli iz vazduha. Ovi atmosferski konstituenti mogu da propuste radijativnu energiju; mogu da raseju energiju putem refleksije ili da apsorbuju energiju. Kako atomi u gasnim molekulama vibriraju i međusobno se približavaju ili udaljavaju (vibraciona energija), ili kako rotiraju jedni oko drugih (rotaciona energija), oni apsorbuju i emituju energiju na određenim talasnim dužinama. Kada je frekvencija ovih molekularnih kretanja približna frekvenciji radijativne energije koja na njih pada, onda molekul može da apsorbuje tu energiju.

¹ IPCC (Međuvladin panel za promenu klime) je telo koje su formirale Ujedinjene nacije za ocenjivanje naučnih, tehničkih i socio-ekonomskih aspekata važnih za razumevanje naučnih osnova rizika antropogenih promena klime, potencijalnih uticaja tih promena i opcija ublažavanja klimatskih promena i adaptacije na izmenjene klimatske uslove.



Slika 1

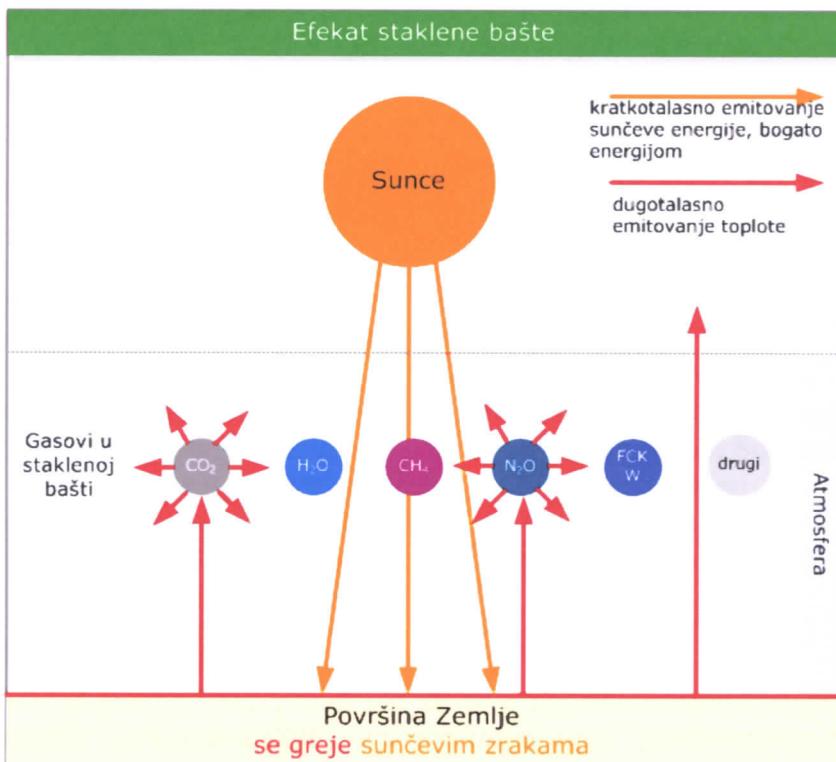
Apsorpcija kao funkcija talasne dužine za vodenu paru (H_2O), ugljen-dioksid (CO_2), metan (CH_4), kiseonik i ozon (O_2 , O_3), azot dioksid (N_2O) i ukupna apsorpcija u atmosferi, ovde prikazana kao spektar dolazećeg Sunčevog zračenja i odlazna toplotna energija sa Zemljine površine na 288K.

Slika 1 prikazuje apsorpione spekture za glavne gasove koji nas u ovom poglavlju interesuju, kao i njihov uticaj na ulaznu Sunčevu energiju i izlaznu infracrvenu radijaciju koju emituje Zemljina površina. Veći deo energije dugih talasa koju emituje Zemlja apsorbuje kombinacija radijativno aktivnih gasova, od kojih su najznačajniji vodena para (H_2O), ugljen-dioksid (CO_2), metan (CH_4), azotni oksid (N_2O), molekularni kiseonik (O_2), i ozon (O_3). Vodena para, koja je najvažniji gas staklene bašte, snažno apsorbuje termalnu energiju talasne dužine preko 18 μm. Ugljen-dioksid ima snažno polje apsorpcije, centrirano oko 15 μm, kao i polja centrirana oko 2,7 μm i 4,3 μm. Između 7 μm i 12 μm postoji relativno bistro nebo za izlaznu termalnu radijaciju, koje nazivamo *atmosferski radijativni prozor*. Radijacija u navedenim talasnim dužinama lako prolazi kroz atmosferu, sa izuzetkom malog, ali bitnog polja apsorpcije između 9,5 μm i 10,6 μm koje se odnosi na ozon (O_3).

Na slici 1 treba primetiti da u suštini svu ulaznu sunčevu energiju talasne dužine manje od 0,3 μm (ultravioletna) apsorbuju kiseonik i ozon. Ova apsorpcija ultravioletnih zraka dešava se u stratosferi, štiteći površinu Zemlje od štetnog ultravioletnog zračenja.

Radijativno aktivni gasovi koji apsorbuju talasne dužine iznad 4 μm zovu se gasovi staklene bašte. Ova apsorpcija zagreva atmosferu, koja, zauzvrat, povratno emituje energiju nazad na Zemlju i u svemir, smanjujući gubitak toplotne energije na Zemljinoj površini, kako je prikazano na slici 2. Takvo dugotalasno zračenje atmosfere prema Zemlji naziva se *protivzračenje atmosfere*. Ovi gasovi staklene bašte deluju kao pokrivač oko Zemljine kugle, povećavajući temperaturu Zemljine površine iznad efektivne temperature. Značaj vodene pare kao gasa staklene bašte je

potpuno očit za vreme bistrih noći, kada se Zemlja hlađi mnogo brže nego tokom oblačnih noći. Takođe je interesantno napomenuti da se izraz *efekat staklene bašte* zasniva na konceptu konvencionalne staklene bašte u kojoj staklo ima veoma sličnu ulogu kao gasovi u našem opisu. Staklo, koje lako prenosi sunčevu energiju kratkih talasa u staklenu baštu, apsorbuje skoro svu energiju dužih talasa koju emituje unutrašnjost staklene bašte. Ovakvo zarobljavanje energije je delom odgovorno za povišenje temperature unutar staklene bašte, mada je ovaj efekat velikim delom prouzrokovani nedostatkom konvektivnog hlađenja u unutrašnjosti usled zatvorenosti. Povišena unutrašnja temperatura u automobilu kada je parkiran na suncu je još jedan primer efekta staklene bašte.



Slika 2

Veći deo dugotalsnog zračenja emitovanog sa površine Zemlje apsorbuje atmosfera, dok jedan deo prolazi kroz atmosferski prozor. Atmosfera, za uzvrat, zrači energiju u svemir i nazad na Zemlju

Kada na Zemlji ne bi postojao efekat staklene bašte, temperatura Zemlje bi bila 254 K. To jest, planeta bi imala prosečnu temperaturu od -19 °C. Zapravo, jedan način da kvantifikujemo efekat staklene bašte jeste da uporedimo efektivnu temperaturu T_e sa stvarnom temperaturom Zemljine površine T_s .

$$\text{Veličina efekta staklene bašte} = T_s - T_e$$

Dakle, pošto je stvarna temperatura Zemlje 288 K, a njena efektivna temperatura je 254 K, možemo da kažemo da efekat staklene bašte dodaje 34 °C zagrevanju Zemljine površine.

Kada bi nestao sav ugljen-dioksid iz atmosfere, Sunčeve zračenje bi se uglavnom odbijalo od površine planete, a Zemlja bi bila hladnija za oko 400°C. Kada uopšte ne bi bilo efekta staklene bašte, Zemlja bi bila zaledeni kamen u svemiru, sa temperaturom od -730°C, dok bi u slučaju intenzivnog efekta staklene bašte Zemlja ličila na Veneru, s prosečnom temperaturom od paklenih 5000°C.

1.2.2. Vodena para

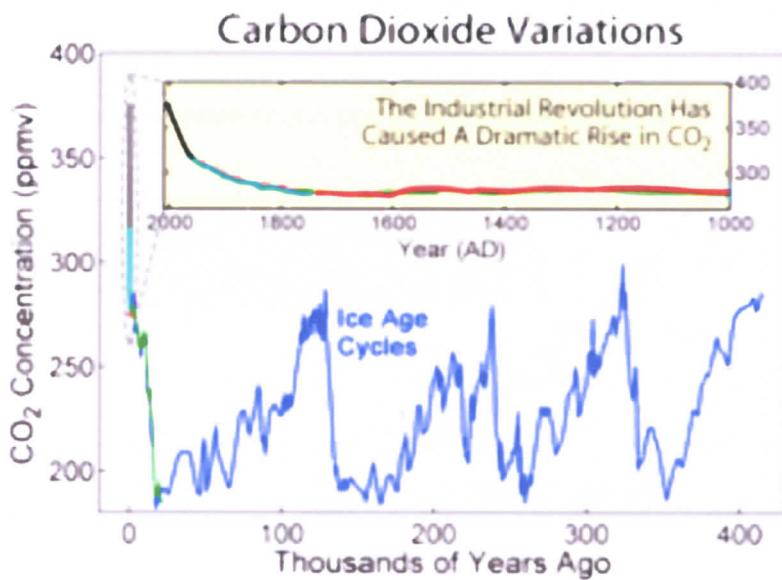
Najefikasniji apsorber dugotalasnog zračenja Zemlje je vodena para. Ona apsorbuje toplotno IC zračenje u intervalu oko $6,3\text{ }\mu\text{m}$. Npr. od 10° do 20° geografske širine H_2O apsorbuje 70%, a CO_2 18% zračenja; na umerenim širinama H_2O apsorbuje 45-65%, a CO_2 18%; u polarnim predelima H_2O apsorbuje 30%, a CO_2 18%. S obzirom na ovako veliki procenat apsorbovanog tamnog Zemljinog zračenja, naročito na malim širinama, hlađenje Zemljine površine se usporava protivzračenjem atmosfere. Njena koncentracija varira u prostoru i vremenu, a uzrok tome leži u osobini vode da se u prirodnim uslovima, za razliku od ostalih sastojaka atmosfere, može javiti u sva tri agregatna stanja: gasovitom, tečnom, i čvrstom. Usled toga bi mogla da se smatra pridodatakom atmosfere. To bi bilo opravdano kada se ne bi uzela u obzir činjenica, da je makar i u najmanjoj količini ima uvek u nižim slojevima atmosfere. Njen udeo u 1m^3 vazduha varira skoro 0-4% i utiče na procentualni udeo drugih sastojaka atmosfere. Ukoliko je imao više, srazmerno se smanjuje prisustvo ostalih sastojaka u vazduhu. Količina vodene pare u vazduhu menja se od ekvatora prema polovima u istom odnosu kao i temperatura. To znači da se količina vodene pare u jedinici zapremljene vazduha smanjuje sa povećanjem geografske širine. Ona se naglo smanjuje i sa povećanjem visine, tako da je u stratosferi (iznad $10\text{-}16\text{ km}$) uopšte nema.

Prisustvo vodene pare u atmosferi ima ogroman značaj za život na Zemlji i za skoro sva fizičko-meteorološka zbivanja u atmosferi. Apsorbujući Sunčevu zračenje i Zemljino izračivanje, znatno utiče na toplotne uslove u troposferi i u površinskom sloju Zemlje što se vidno odražava na energetski bilans atmosfere; ona ima važnu ulogu u obrazovanju oblaka i padavina bez kojih je ljudska delatnost teško zamisliva, posebno u poljoprivredi.

1.2.3. Ugljen-dioksid (CO_2)

Već više od jednog veka poznato je dejstvo ugljen-dioksida kao gasa staklene bašte. Arenijus (Arrhenius, 1896) se pripisuje prvo proračunavanje globalne temperature u funkciji atmosferskog sadržaja CO_2 , a njegovi rezultati se ne razlikuju mnogo od rezultata kojima danas raspolažemo. U diskusijama o efektu staklene bašte ovom gasu je uvek pridavana najveća pažnja jer on zaista predstavlja oko dve trećine trenutno postojećeg radijativnog forsinga.

Jedna indirektna procena bi mogla da se napravi ispitivanjem koncentracije CO_2 i drugih gasova koji su zarobljeni u vazdušnim mehurima zaledenog snega. Procene ovih koncentracija u predindustrijskom periodu dobijene tehnikom analize mehura vazduha, kreću se od 265 do 290 ppm (milioniti deo zapremljene). Koncentracije u 1958. godini su oko 315 ppm ili 10-20% više. Mali deo tog porasta mogao bi se prisati krčenju šuma i prirodnim promenama, dok je njegov veći deo posledica sagorevanja karbonatnih goriva (ugalj, benzin, nafta). Podaci koji ukazuju na značajne promene CO_2 predstavljeni su na slici 3.

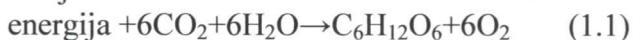


Slika 3

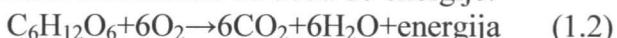
Promena koncentracije CO₂ (u milionitim delovima zapremine) za poslednjih 400.000 godina

Prva kontinuirana, precizna i direktna merenja atmosferskog ugljen-dioksida počela su 1957. na Južnom polu, i 1958. u Mauna Loa, na Havajima u to vreme je akumulacija iznosila oko 315 ppm, i rasla je po stopi od manje od 1 ppm godišnje. Do 1994, to je poraslo na 358 ppm i raste po stopi od 1,6 ppm godišnje. Od 1995-2005. koncentracija CO₂ raste za 19 ppm što je najveći prosečni porast zabeležen od kada su započela direktna merenja CO₂. Antropogena emisija ugljen-dioksida locirana je prvenstveno na severnoj hemisferi, ali vazduh severne i vazduh južne hemisfere se dovoljno mešaju tako da su koncentracije CO₂ tek nekoliko milionitih delova više u Mauna Loa nego na Južnom polu.

Oscilacije koncentracija CO₂ prouzrokovane su sezonskim promenama u stopama fotosinteze i respiracije. Tokom fotosinteze, ugljenik prelazi iz vazduha u biljni materijal. Tokom proleća i leta kada biljke najbrže rastu, nivo CO₂ u atmosferi opada i dostiže najniži nivo u severnoj hemisferi negde u oktobru slika 4 (inset). Reakcija fotosinteze je data kao:



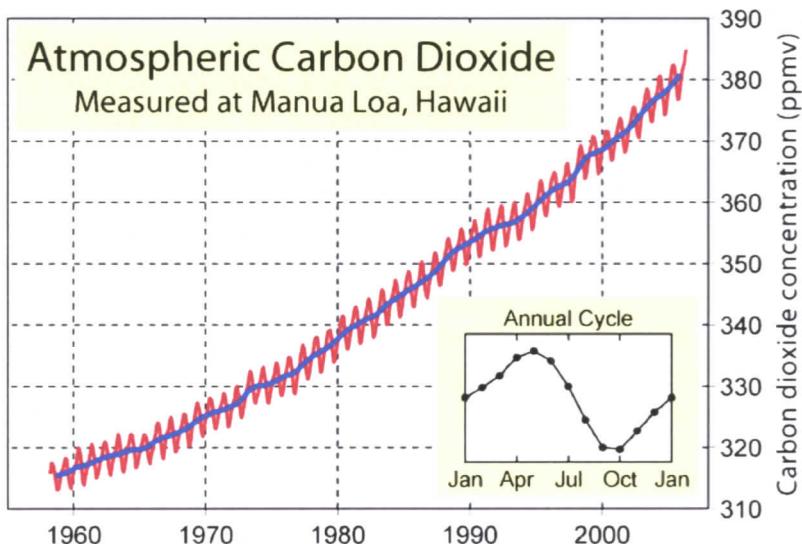
Povratna reakcija navedene reakcije daje nam jednačinu koja opisuje respiraciju, a to je proces koji živa bića koriste da dođu do energije:



Tokom respiracije, složeni organski molekuli se razgrađuju i vraćaju ugljenik u atmosferu. Kada je stopa respiracije veća od stope fotosinteze, onda dolazi do neto dobitka ugljenika u atmosferi što prouzrokuje maksimalne koncentracije u severnoj hemisferi negde oko maja meseca. Ugljenik se tako tokom fotosinteze kontinuirano kreće iz atmosfere u lanac ishrane, i vraća se u atmosferu tokom respiracije.

Koncentracije ugljen-dioksida u atmosferi koje dolaze sa ledenih prostora Antarktika tokom poslednjih 1000 godina, u kombinaciji sa novijim merenjima u Mauna Loa, prikazani su na slici 4.

U predindustrijskom periodu koncentracije se kreću blizu 280 ppm, a to je vrednost koja se obično koristi kao referentna tačka za poređenje sa sadašnjim stanjem i budućim predviđanjima. Koncentracije ugljen-dioksida su trenutno skoro 30% više nego što su bile neposredno pre industrijske revolucije.



Slika 4

Koncentracija CO_2 u proteklih 1000 god. određena iz uzorka leda sa Antartika i Mauna Loa. Vremenska promena koja je uzeta iznosi 10 god. (Izvor: IPCC, 2001)

1.2.4. Ciklus ugljenika

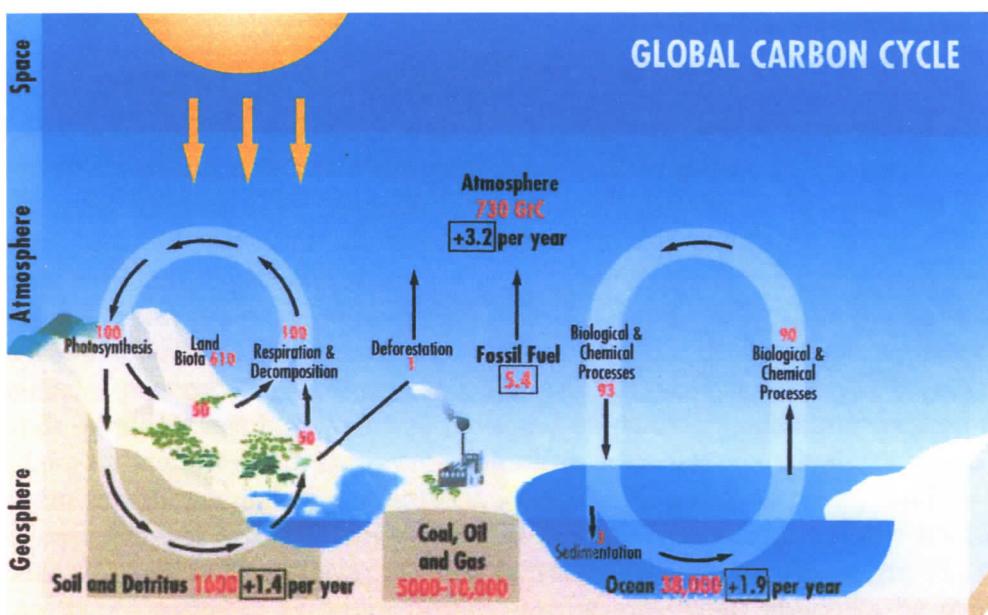
Pošto ugljen-dioksid igra važnu ulogu u klimatskim promenama, on je bio predmet pažnje istraživača u mnogo većoj meri nego ostali gasovi i aerosoli. Njegova koncentracija je od 1800-tih godina porasla za oko 30%, i nastavlja da raste po stopi od oko 1,53 ppm godišnje, kako čovečanstvo nastavlja da sagoreva fosilna goriva i da menja količinu biomase na Zemljinoj površini.

Prirodni procesi neprekidno transportuju ogromne količine ugljenika s jednog na drugo mesto u atmosferi, biosferi i okeanima. Tokom fotosinteze ugljenik ulazi u lanac prehrane, a vraća se u atmosferu tokom respiracije. Okeani rastvaraju ugljen dioksid i skoro celog ga skladište u obliku bikarbonatnih jona (HCO_3^-), ali deo ugljenika postaje deo morskog lanca prehrane. Veoma mali deo nežive organske materije svake godine završava u obliku sedimenata. Spora, dugotrajna akumulacija organskog ugljenika predstavlja izvor naših fosilnih goriva – nafte, prirodnog gasa, i uglja. Prilikom sagorevanja ovih goriva, stari ugljenik se vraća u atmosferu. U poređenju sa prirodnim putevima ugljenika, dodatne količine koje se emituju u atmosferu kroz sagorevanje i promene u načinu korišćenja zemljišta su skromne, ali i dovoljne da proizvode značajnu reakciju klimatskog sistema.

Prelazak ugljenika iz jednog rezervoara u drugi, kao i količine ugljenika uskladištene u tim rezervoarima sumarno su prikazane na slici 5. Kao što se može videti, ukupne količine ugljenika u atmosferi 1980-tih godina procenjene su na 750 GtC, pri čemu 1 GtC znači 1 gigatona ugljenika (10^9 tona ili 10^{12} kilograma). Pošto je najveći deo tog ugljenika u obliku CO_2 (manje od 1 posto je u drugim jedinjenjima koja sadrže ugljenik, kao što su metan i ugljen-monoksid), u većini okolnosti je razumno prepostaviti da je celokupna količina atmosferskog ugljenika u obliku CO_2 . Količina

ugljenika zarobljenog u vegetaciji (610 GtC) je otprilike istog reda veličine kao i količina atmosferskog ugljenika, ali ni jedna od ovih količina se ne može uporediti sa količinom u okeanima. Okeani sadrže više od 50 puta veću količinu ugljenika nego atmosfera.

Tokom 1980-tih, usled sagorevanja fosilnih goriva i proizvodnje cementa, u atmosferu se emitovalo oko 5,5 GtC godišnje (do 1990-tih, ove emisije su dostigle 6,1 GtC/godišnje). Teško je napraviti procene količine smanjenja sadržaja ugljenika uskladištenog u tropskoj vegetaciji koji se oslobađa kroz aktivnosti kao što je sagorevanje biomase i seča šuma, ali se procenjuje da ove promene u načinu korišćenja tropskih šuma emituju oko 1,6 GtC godišnje. Ponovni rast šuma u severnoj hemisferi poništava deo efekata usled promena u korišćenju tropskog zemljišta uklanjanjem oko 0,5 GtC godišnje iz atmosfere. Još jedan dodatni "terestrijalni ponor" se pripisuje stimulisanom uzgoju bilja usled povećanih količina ugljen-dioksida u vazduhu i povećanog taloženja azota u tlu usled sagorevanja fosilnih goriva. Tako se smatra da NO₂ i CO₂ đubriva uzrokuju situaciju da je fotosinteza veća od respiracije, što uzrokuje neto uklanjanje ugljenika iz atmosfere od 1,3 GtC godišnje. Kretanje ugljenika između okeana i atmosfere je veliko, oko 80 GtC/godišnje, i neto efekat tih kretanja je uklanjanje iz atmosfere oko 2 GtC/godišnje.



Slika 5

Globalni ciklus ugljenika koji prikazuje rezervoare ugljenika (GtC), fluks (GtC/god.), a koji je uprosećen za period od 1980 – 1989 god. (Izvor: IPCC, 1996)

Tabela 1 sumarno prikazuje dodavanje ugljenika u atmosferu prouzrokovano ljudskim aktivnostima, kao i učešće tih dodavanja u različitim rezervoarima ugljenika. Tokom 1980-tih, sagorevanje fosilnih goriva i promene u načinu korišćenja zemljišta u tropskim krajevima dodavalo je u atmosferu 7,1 GtC/godišnje. Od tih 7,1 GtC/godišnje, 3,8 GtC/godišnje završavalo je u okeanima i drugim terestrijalnim ponorima, a presotalih 3,3 GtC/godišnje ostajalo je u atmosferi. Odnos između količine koja ostaje u atmosferi i emitovanog atmosferskog ugljenika poznat je pod nazivom "airborne fraction" – vazdušna frakcija. Korišćenjem ovih podataka, vazdušna frakcija je :

$$\text{Vazdušna frakcija} = \frac{\text{GtC/god. količina koja ostaje u atmosferi}}{\text{GtC/god. antropogena emisija}} = 0,46$$

Prosečna godišnja promena količine CO₂ u atmosferi za period	1980 - 1989. god.	1990-1999. god.	2000-2005. god.
Izvori ugljen-dioksida			
Emisija iz sagorevanja fosilnih goriva i proizvodnje cementa	5,5±0,5	6,4±0,4	7,2±0,3
Promene koje potiču od korišćenja tropskog zemljišta	1,6±1,0	1,6±1,0	0,9±0,6
Ukupna antropogena emisija	7,1±1,1 GtC/god.	8,0 GtC/god.	8,1 GtC/god.
Raspodela između rezervoara			
Okeani	2,0±0,8	2,2±0,4	2,2±0,5
Šume severne hemisfere	0,5±0,5	1±0,6	0,9±0,6
Ostali kopneni ponori (CO ₂ i azotna đubriva, klimatski efekti)	1,3±1,5	2,6	nije dostupno
Skladištenje u atmosferi	3,3±0,2 GtC/god	3,2±0,1 GtC/god	4,1±0,1 GtC/god

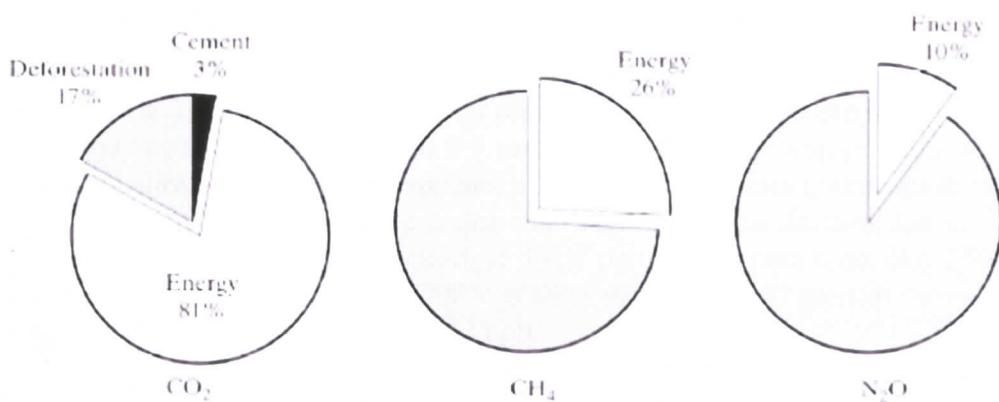
Tabela 1

Prema tome, grubo govoreći, otprilike polovina ugljenika koji smo emitovali tokom 1980-tih godina ostala je u atmosferi. Slična situacija je i u sledećoj dekadi, dok se u periodu od 2000-2005. skladištenje u atmosferi povećalo. Ta vazdušna frakcija je veoma koristan parametar koji nam pomaže u izradi predviđanja CO₂ u budućnosti za slučaj različitih scenarija emisije.

Vazdušna frakcija ne mora obavezno da bude fiksna količina. Na primer, ukoliko se sa velikih površina iseče šuma, sposobnost biosfere da apsorbuje ugljenik biće smanjena, a povećaće se vazdušna frakcija. Takođe, veštačka đubriva na bazi CO₂ mogu da stimulišu rast bilja, čime se povećava stopa uklanjanja atmosferskog ugljenika, tako da se vazdušna frakcija smanjuje. Vazdušna frakcija takođe zavisi od brzine kojom se ugljenik dodaje u atmosferu. Za scenarije u kojima postoji mali ili nikačav porast emisije, ili čak u kojima postoji pad emisije, okeani i biljke imaju više vremena da apsorbuju ugljenik, tako da je vazdušna frakcija manja, možda negde oko 35 %. Za scenarije sa brzim rastom emisije, rezervoari ugljenika ne mogu da održe tempo i frakcija koja ostaje u atmosferi može da bude blizu 55 %.

Emisija ugljenika iz fosilnih goriva

Sagorevanje fosilnih goriva predstavlja oko 80 % emisije CO₂, pri čemu se ostatak uglavnom odnosi na seču šuma i nešto manji iznos na proizvodnju cementa. Naše korišćenje energije je takođe značajan izvor ostalih gasova staklene bašte, kako se vidi na slici 6. Sem toga, fosilna goriva su važan izvor nastanka ozona, ugljen-monoksida, azotnih oksida i isparljivih hemikalija, kao i glavni izvor sumpornih aerosola.

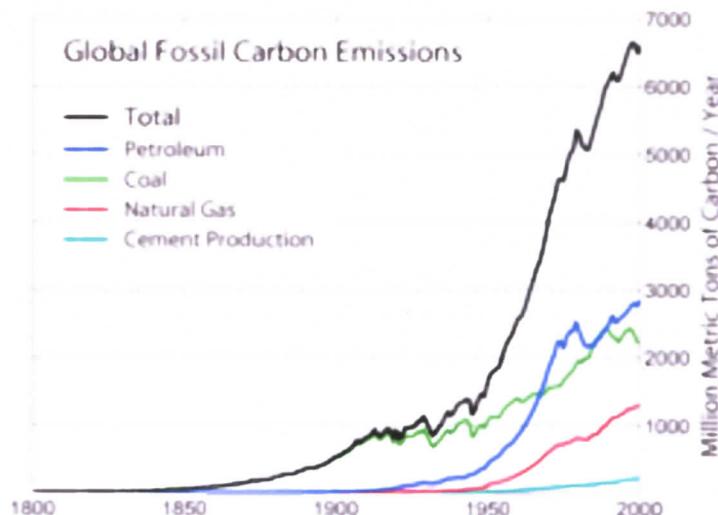


Slika 6

Proizvodnja energije je glavni izvor gasova staklene bašte. Procentualne vrednosti predstavljaju deo antropogene emisije povezane sa dobijanjem energije.

Količina ugljenika koji se emituje po jedinici isporučene energije naziva se intenzitet ugljenika. Neka goriva imaju visok intenzitet ugljenika, kao što je ugalj, a neka uopšte ne emituju ugljenik, na primer hidro ili nuklearna energija. Interesantno je da goriva iz biomase takođe mogu da se koriste na načine koji ne emituju nikakvu neto količinu ugljenika. Odnosno, gorenjem goriva iz biomase, ugljenik se prosti vraća u atmosferu u količini koju je ta biomasa nekada uzela iz atmosfere. Sve dok se količina sagorele biomase zamenjuje novim biljnim materijalom svake godine, neto ispuštanje ugljenika je ravno nuli.

Tabalka (1985) je procenio da će potrošnja fosilnih goriva u dvadeset prvom veku udvostručiti količinu CO₂ u atmosferi. Mnogi klimatski modeli koriste dvostruku količinu ugljen-dioksida radi ispitivanja efekata koje gasovi staklene bašte imaju na klimu. S obzirom na plan o redukciji antropogene emisije CO₂, sasvim je moguće da će se broj izvora ugljen-dioksida, smanjiti u sledećem veku.



Slika 7

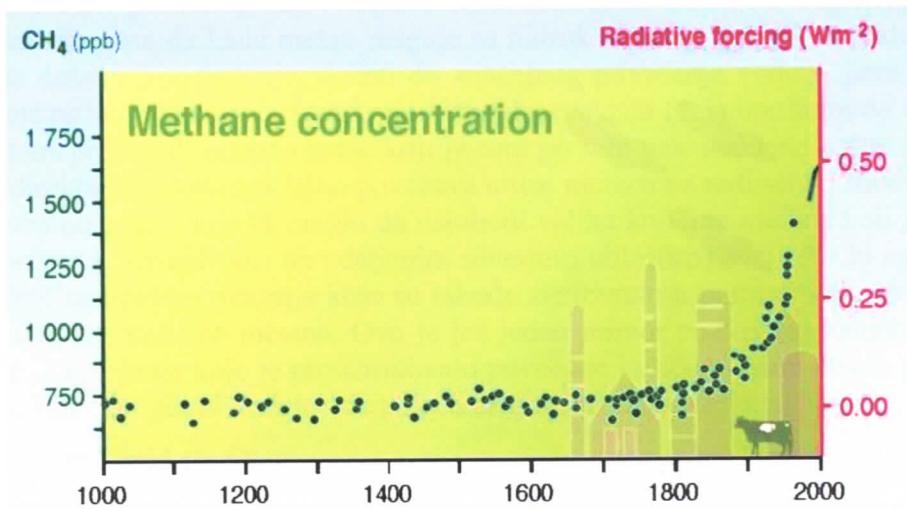
Kretanje emisije (CO₂) po vrstama goriva

1.2.5. Metan (CH_4)

Akumulacija energije metanom u atmosferi predstavlja $0,47 \text{ W/m}^2$ radijativnog forsinga², što je 19% ukupnog forsiranja preko gasova staklene bašte. Metan ima talasnu dužinu apsorpcije centriranu na $7,7 \mu\text{m}$, na ivici atmosferskog prozora. Kako je prikazano na slici 8, koncentracije metana u atmosferi stotinama godina su se kretale oko 700 milijarditih delova (ppb) sve dok nisu rapidno počele da rastu tokom 1800. Godine 1992. te koncentracije su dostigle 1714 ppb, što je porast od oko 250 % u odnosu na predindustrijsko vreme. 2005. godine merenja na 40 mernih mesta pokazuju srednju vrednost od $1774,62 \pm 1,22 \text{ ppb}$.

Metan je još jedan gas koji se prirodno javlja, a čija koncentracija raste usled ljudskih aktivnosti. Proizvodi se bakterijskom fermentacijom u anaerobnim uslovima, na primer u močvarama, pirinčanim poljima, deponijama otpada, i u digestivnom traktu preživara. Metan se takođe oslobođa tokom proizvodnje, transporta i korišćenja fosilnih goriva. Iz prirodnih izvora metana, uključujući vlažna mesta, eroziju zemljišta, i okeane, oslobođa se oko 168 miliona tona godišnje u periodu 1996-2001. dok antropogeni izvori u istom periodu oslobođaju oko 428 miliona tona (Chen and Prinn, 2006). Skoro polovina antropogene emisije otpada na proizvodnju hrane za ljudsku upotrebu (slika 9). Živa stoka, uglavnom goveda, ovce, i bufalo, proizvode oko 80 miliona tona metana godišnje, pirničana polja oko 60 miliona, raščišćavanje i sagorevanje biomase radi pripreme terena za ispašu i setvu su izvor sledećih 40 miliona. Više od $\frac{1}{4}$ antropogene emisije, ili oko 100 tona godišnje, povezano je sa fosilnim gorivima. Kako proizvodnja hrane i energije raste da bi se zadovoljile potrebe sve većeg broja stanovnika, emisija metana će nastaviti da predstavlja značajan element radijativnog forsinga.

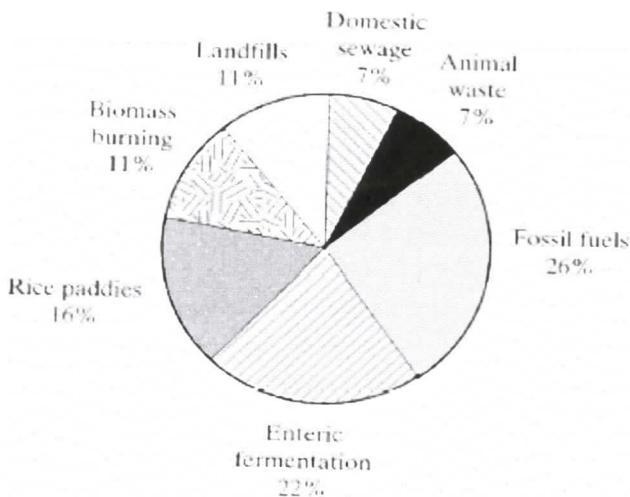
Metan se uklanja iz atmosfere prvenstveno preko reakcija sa hidroksilnim radikala (OH):



Slika 8

Koncentracija CH_4 određena iz uzorka leda uzetog na Antartiku u kombinaciji sa skorašnjim merenjima. Radijativni forsing je takođe prikazan. (Izvor: IPCC, 2001)

² Kao mera poremećaja energetskog bilansa Zemlje koristi se tzv. radijativni forsing, koji predstavlja razliku između prispevog kratkotalasnog sunčevog zračenja i dugotalasnog zračenja emitovanog u kosmos. Izražava se u W/m^2 .



Slika 9

Antropogeni izvori CH₄ ukupna emisija iz antropogenih izvora je procenjena na 375 miliona tona/god.; prirodni izvori doprinose sa 160 miliona tona/god. (Bazirano na IPCC, 1995)

Metan je, svakako, gas staklene bašte i kao takav ima direktni uticaj na radijativni forsing. Uz to postoji i nekoliko indirektnih efekata koji su uzrok dodatnog forsiranja, što se vidi iz hemijske reakcije(1.3). Najpre, kada metan reaguje sa hidroksilom (OH), koncentracija OH opada. Uz gubitak raspoloživog OH, smanjuje se stopa uklanjanja CH₄ i time se produžava atmosferski rok trajanja preostalog metana. Uz duži vek trajanja CH₄ u atmosferi, on duže apsorbuje infracrvene zrake i time povećava potencijal globalnog zagrevanja. Sledeći indirektni uticaj na razgradnju organskih materija jeste da kada metan reaguje sa hidroksilom on proizvodi vodenu paru. Kada se dešava ova reakcija, dolazi do značajnog povećanja vodene pare, što je u atmosferi prilično značajno. I na kraju hemijska reakcija (1.3) implicira da uništavanje metana proizvodi porast ozona, koji je sam po sebi gas staklene bašte. Zbir svih ovih indirektnih efekata značajno povećava uticaj metana na radijativni forsing.

Globalno zagrevanje bi moglo da osloboди velike količine metana koji je trenutno zamrznut u permafrostu na udaljenim severnim oblastima sveta što bi omogućilo anaerobnu razgradnju materija koje su takođe zamrznute u permafrostu, što bi oslobođilo dodatne količine metana. Ovo je još jedan primer pozitivnog kruga povratne reakcije. Zagrevanje koje je prouzrokovalo povećane količine oslobođenih gasova iz staklene bašte moglo bi dodatno da pojača originalno zagrevanje.

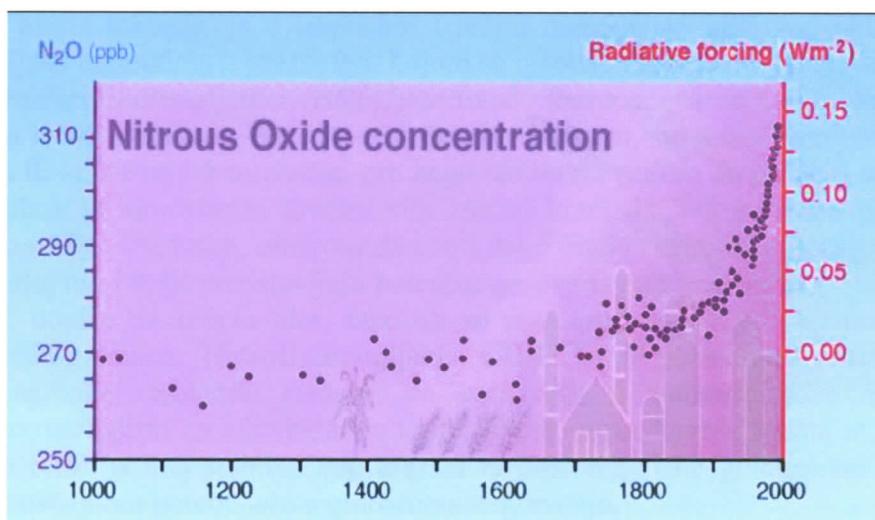
1.2.6. Azotni oksid (N₂O)

Azotni oksid (“smešni gas”) je takođe gas staklene bašte čije koncentracije rastu kao posledica ljudskih aktivnosti. Trenutne atmosferske koncentracije su oko 312 ppb, što je porast od 13% u odnosu na predindustrijske koncentracije koje su bile oko 275 ppb. Trenutna stopa porasta azotnog oksida je procenjena na 0.6 ppb, odnosno na 0.2% godišnje. U 2005. godini koncentracije su bile oko $319 \pm 0,12$ ppb. Slika 10 pokazuje koncentracije u poslednjih hiljadu godina i s tim povezani radijativni forsing. Pri stopi od $0,14 \text{ W/m}^2$ ovaj gas predstavlja 6% ukupnog radijativnog forsinga u industrijsko vreme.

Azotni oksid se ispušta u atmosferu najviše tokom nitrifikacionog dela azotnog ciklusa:



Procenjuje se da prirodni izvori N_2O daju 9 miliona tona azota godišnje u atmosferu, što većinom potiče od okeana i mokrog šumskog zemljišta. Antropogeni izvori predstavljaju oko 40% ukupne emisije N_2O , ili 5,7 miliona tona godišnje (IPCC, 2007). Skoro dve trećine antropogene emisije je rezultat poljoprivrednih aktivnosti. Novoraščišeno šumsko zemljište pokriva se travnatim zemljištem i proizvodi značajne emisije N_2O , a dodatna emisija potiče i od azotnih đubriva. Ostali izvori obuhvataju trosmerne katalitičke konvertore na automobilima, sagorevanje goriva koja sadrže azot, i razne industrijski procese kao što je proizvodnja najlona.



Slika 10

Porast koncentracije N_2O koji prati porast radiacione snage (Izvor: IPCC, 2001)

Očito, ne postoje značajni prijemnici u troposferi za N_2O i on se samo sporo razgrađuje u stratosferi putem fotosinteze. Zbog toga, ovaj gas ima dug životni vek u atmosferi, koji se procenjuje na 120 godina, što podrazumeva da će perturbacije u prirodnom ciklusu imati dugoročne posledice. Azotni oksid ima polje apsorpcije na 7,8 μm što je u vezi sa proširenjem ugla veze. Polje od 7,8 μm nalazi se na ramenu atmosferskog prozora a polje 8,6 μm je tačno na prozoru, tako da N_2O predstavlja gas staklene bašte velikog potencijala.

1.2.7. Halougljenici

Halougljenici su molekuli na bazi ugljenika koji sadrže hlor, fluor ili brom. Veza ugljenik-fluor oscilira i zato apsorbuje talase oko 9 μm, a druga veza koja se širi i savija u halougljenicima takođe se javlja sa frekvencijama u atmosferskom prozoru, tako da svi ti molekuli predstavljaju moćne gasove staklene bašte. Oni su važni sa ekološkog stanovišta ne samo zato što doprinose globalnom zagrevanju, nego i zato što atomi hlorova i bromova koji dospevaju u stratosferu imaju sposobnost da katalitički uništavaju ozon.

Podkategorije halougljenika uključuju hlorofluorougljenike (CFC) koji imaju samo ugljenik, fluor i hlor, ali nemaju vodonik; hidrohlorofluorougljenici (HCFC) koji su kao CFC ali sadrže i vodonik, HFC koji ne sadrže hlor; i *haloni*, koji su molekuli na bazi ugljenika a sadrže i brom uz hlor i nekada hlor. Ovi halougljenični

gasovi razlikuju se od svih drugih aktivnih gasova utoliko što se ne javljaju prirodno i njihovo prisustvo u atmosferi uzrokovano je isključivo ljudskim delatnostima. Ostali važni halogenjenici uključuju ugljenik tetrahlorid (CCL_4), metil hloroform (CH_3CCL_3), i metil bromid (CH_3Br).

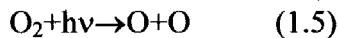
Hlorofluorougljenici (CFC) su netoksični, nezapaljivi, nereaktivni i nisu rastvorljivi u vodi, što je u vreme kada su tek stvoreni prouzrokovalo verovanje da se radi o sasvim benignim hemikalijama. Ali pošto nisu reaktivni i pošto se ne rastvaraju u vodi, oni se ne uništavaju u hemijskim reakcijama i ne uklanjuju se iz troposfere putem kiše. To znači da imaju dug životni vek u atmosferi. Jedini poznati mehanizam uklanjanja je fotoliza preko kratkotalasne solarne radijacije, do čega dolazi nakon što molekuli pređu u stratosferu. Upravo hlor koji se u ovom procesu oslobađa uništava ozon u stratosferi. Slično tome, haloni, koji sadrže brom, nemaju nikakva mesta sakupljanja u troposferi i jedini mehanizam njihovog uklanjanja je fotohemski razgradnja u stratosferi, kojom se oslobađa brom koji uništava ozon.

Hidrohlorofluorougljenici (HCFC) se uvode kao zamena za CFC. Dodavanjem vodonika u ove molekule, oni više nisu hemijski inertni, što znači hemijske reakcije mogu da ih uništavaju u troposferi pre nego što imaju priliku da pređu u stratosferu. Dakle, njihov je atmosferski životni vek znatno kraći. HCFC su samo privremene zamene za CFC, međutim, obzirom da one i dalje imaju određeni potencijal da troše ozonski sloj oni i dalje predstavljaju potentne gasove iz staklene bašte.

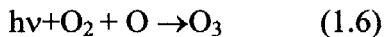
HFC uopšte ne sadrže hlor, tako da su povoljniji od HCFC u smislu zaštite stratosferskog ozona. Hidrofluorougljenik CH_2FCF_3 u poslednje vreme ubrzano postaje najbolje rashladno sredstvo za korišćenje u automobilskim rashladnim uređajima, uređajima za klimatizaciju i u frižiderskim uređajima. Međutim, čak i ova hemijska reakcija ima stabilan atmosferski životni vek (14,6 godina) što doprinosi njenom značajnom potencijalu u globalnom zagrevanju.

1.2.8. Ozon (O_3)

Molekuli ozona se sastoje od 3 atoma kiseonika, pa je prema tome on modifikovani kiseonik. Nastaje pod dejstvom Sunčevog ultraljubičastog zračenja, koje vrši disocijaciju izvesnog broja molekula kiseonika na njegove slobodne atome



Istovremeno to zračenje dovodi do spajanja atoma i molekula kiseonika



Pod dejstvom ultraljubičastog (UV) zračenja odigrava se istovremeno inverzan proces u kome se molekuli ozona raspadaju na atome kiseonika, i na taj način se u atmosferi održava približno ista količina ovog gasa.

Ozon se nalazi u troposferi, stratosferi i u donjem delu mezofere. U manjim količinama se nalazi pri tlu u atmosferi zagađenih gradova. Koncentracija mu se menja u vremenu i prostoru, pre svega na visini 15-30 km, gde se ova komponenta generiše i razara u fotohemiskim reakcijama. Ne samo da se njegove koncentracije razlikuju od mesta do mesta na zemaljskoj kugli, nego i njegov uticaj na klimu takođe zavisi i od vertikalne distribucije. Te koncentracije takođe variraju zavisno od godišnjeg doba, jer letnji meseci sa više sunčeve svetlosti pokreću stvaranje ozona. Najveći deo UV zračenja apsorbuje upravo ozon, tako da ovo zračenje opasno po živi svet ne stiže do površine Zemlje. Međutim, znatnu zabrinutost izazivaju nedavno dobijeni podaci o njegovoj smanjenoj koncentraciji u visokim slojevima atmosfere, što se pripisuje dejstvu veštački proizvedenih hlorofluorougljenika. Njihovim disociranjem oslobađa se hlor, koji oduzima atom kiseonika molekulu ozona. Slobodni atom kiseonika iz atmosfere formiranom hloromonoksidi odzuće njegov atom kiseonika, a ovim oslobođen hlor ponovo uzima atom kiseonika nekom drugom

molekulu ozona. Na taj način jedan atom hlora je u stanju da razloži ogroman broj molekula ozona. Pored hlorofluorougljenika i ugljen-monoksid i azotni oksidi (NO_x) utiču na njegovu koncentraciju, pa i na taj način utiču na zagrevanje staklene bašte. Apsorpciona traka za IR zračenje je na $10\mu\text{m}$.

1.3. Radijativni forsing od predindustrijskog vremena

Koncept radijativnog forsinga klimatskih promena može da se primeni na akumulaciju gasova staklene bašte u atmosferi, promene aerosola iz prirodnih i antropogenih izvora, osiromašenje ozona u atmosferi, fotohemski proizvedenu akumulaciju ozona u atmosferi i prirodnu varijabilnost solarnog zračenja koje dopire do spoljne atmosfere Zemlje. Moguće je i pozitivno i negativno forsiranje. Pozitivno forsiranje doprinosi globalnom zagrevanju, a negativno forsiranje ima tendenciju da hlađi Zemlju.

Gasovi i čestice koje se emituju u atmosferu mogu da izazovu kako *direktne* tako i *indirektne* efekte radijativnog forsinga. Direktno forsiranje prouzrokuju supstance u atmosferi koje su emitovane iz nekog izvora. Indirektno forsiranje se dešava kada te supstance nastave da prouzrokuju druge atmosferske promene koje utiču na radijativne osobine atmosfere. Na primer, aerosoli imaju direktni uticaj na forsiranje kada apsorbuju ili reflektuju sunčevu svetlost. Aerosoli takođe mogu da uzrokuju indirektne efekte kada indukuju promene u albedu oblaka. Halougljenici su još jedan primer direktnog i indirektnog uticaja. Direktni efekat halougljenika je porast radijativnog forsinga usled činjenice da ovi gasovi apsorbuju dugotalasnu radijaciju Zemlje. Međutim, oni takođe uzrokuju i indirektni efekat uništavanjem ozona u atmosferi. Uništavanje ozona otvara prozor i omogućava brže hlađenje Zemlje. Prema tome, direktni efekat halougljenika doprinosi globalnom zagrevanju, dok indirektni efekat uništavanja ozona deluje u suprotnom pravcu i doprinosi hlađenju planete.

Tabela 2. prikazuje trenutne procene radijativnog forsinga pod direktnim i indirektnim uticajem gasova staklene bašte.

1.3.1. Radijativni forsing usled gasova staklene bašte

Osnovni gasovi staklene bašte navedeni su u tabeli 2. Vodena para je ovde izostavljena jer na njenu koncentraciju u atmosferi čovek za sada ne utiče. Mada je povrata sprega vodene pare veoma značajna, većina klimatologa uticaj vodene pare ne smatra za radijativni forsing. U drugom delu diplomskog rada ćemo razmatrati uticaj ostalih gasova staklene bašte.

Svi ovi gasovi se dobro mešaju u atmosferi i mehanizmi njihovog radijativnog forsinga su dobro poznati. Radijativni forsing koji je prouzrokovao vulkan Pinatubo 1991. godine izračunato je na -4 W/m^2 godinu dana nakon erupcije, ali je na isteku druge godine forsiranje spalo na -1 W/m^2 . Ovaj negativni radijativni forsing može se uporediti sa forsiranjem od $+2,45 \text{ W/m}^2$ usled gasova staklene bašte, a pad globalne temperature površine zemlje odmah nakon erupcije Pinatuba bio je konzistentan sa predviđanjima na osnovu opšteg modela cirkulacije, slika 11.

Priznajući poteškoće u procenjivanju globalnih prosečnih radijativnih forsinga za aerosole, ipak je važno doći do nekakvog kvantitativnog pokazatelja koji opisuje njihov uticaj. IPCC (1996) sugerise da direktno forsiranje prouzrokovano refleksijom i apsorpcijom od predindustrijskog vremena iznosi oko $-0,5$, sa faktorom 2, dok je indirektno forsiranje povezano sa uticajem na oblake između 0 i $-1,5 \text{ W/m}^2$. Uz oprez se preporučuje neka srednja vrednost od $-0,8 \text{ W/m}^2$, što bi značilo da je ukupan direktni i indirektni uticaj aerosola oko $-1,3 \text{ W/m}^2$. Ovo treba uporediti sa procenom za

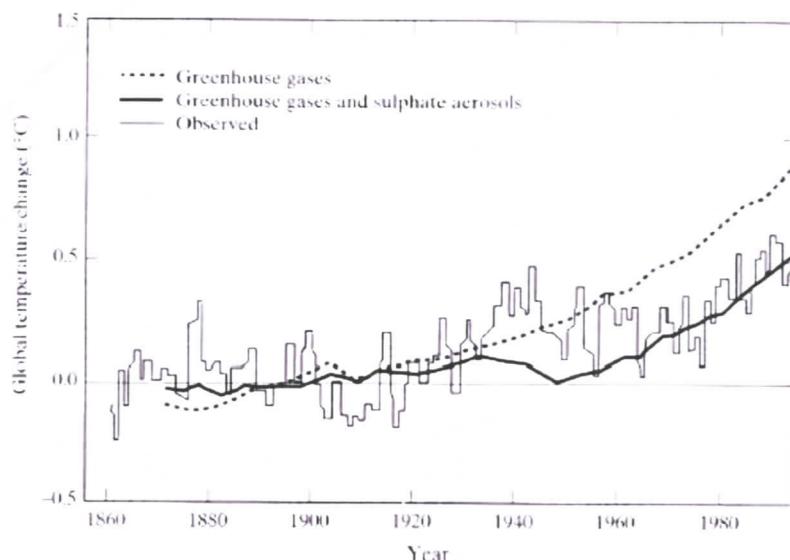
forsiranje od $+2,45 \text{ W/m}^2$ koje je prouzrokovano dobro izmešanim gasovima staklene bašte CO_2 , CH_4 , N_2O i halouglijenicima. Ukoliko su ove procene validne, to bi značilo da globalno hlađenje prouzrokovano aerosolima trenutno neutrališe oko jedne polovine globalnog zagrevanja prouzrokovanih gasovima staklene bašte.

Najnovije procene uticaja aerosola na globalne temperature su pomogle da se kompjuterske simulacije u većoj meri približe stvarnim merenjima temperature. Ranije, kada se radilo modeliranje samo gasova iz staklene bašte, simulirane temperature su bile mnogo više nego što su zaista trebale da budu. Uključivanjem rashlađujućeg uticaja aerosola, sada postoji mnogo bolja korelacija između simuliranja i realnosti, što se vidi sa slike 11.

Globalna prosečan radijativni forsing izražen preko promene gasova staklene bašte od 1850 do danas			
	Radijativni forsing ΔF (W/m^2)	Nivo	Komentari i procene vrednosti
DIREKTNI UTICAJ NA EFEKAT STAKLENE BAŠTE Ugljen dioksid CO_2	1,56	Visok	CO_2 od 278 do 356 ppm
Metan CH_4 Halogenovani ugljovodonici Azot dioksid N_2O	0,47 0,28 0,14	Visok Visok Visok	CH_4 od 700 do 1714 ppm Uglavnom CFC-11, -12, -113 N_2O od 275 do 311 ppm
Ukupno	2,45	Visok	Opseg od 2,1 do 2,8 W/m^2
INDIREKTNI UTICAJ NA EFEKAT STAKLENE BAŠTE Stratosferski ozon O_3 Troposferski ozon O_3	-0,1 0,4	Nizak Nizak	Opseg od -0,05 do -0,2 W/m^2 Opseg od 0,2 do 0,6 W/m^2

Tabela 2

Trenutne procene radijativnog forsinga pod direktnim i indirektnim uticajem gasova staklene bašte (Izvor: IPCC, 2001).

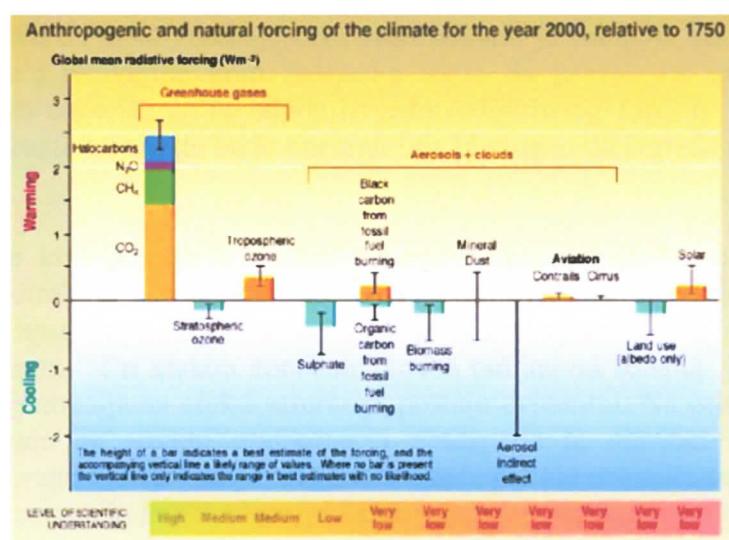


Slika 11

Simulacija globalnog godišnjeg zagrevanja od 1860 do 2000. za gasove staklene bašte (isprekidana kriva) i za gasove staklene bašte uz sulfatne aerosole (puna linija), upoređena sa izmerenim vrednostima. (Izvor: IPCC, 1996)

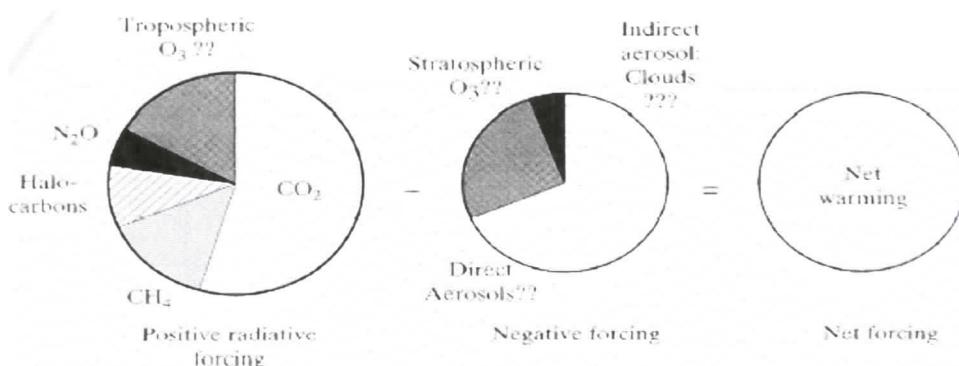
1.3.2. Kombinovani uticaj

Slika 12 sumarno prikazuje procene radijativnih forsinga u periodu od 1750 do 2000. koja su prouzrokovana gasovima staklene bašte, stratosferskog i troposferskog ozona, sulfata, čadi, i aerosola iz biomase, direktnog uticaja aerosola na oblake, i procjenjenog porasta sunčevog intenziteta koji se u istom periodu javio. Zajedno sa pokazateljima neizvesnosti prikazani su i pokazatelji pouzdanosti navedenih procena. Nivo pouzdanosti za većinu procenjivanih podataka je nizak, ili veoma nizak, sa izuzetkom dobro poznatog direktnog uticaja gasova staklene bašte, tj. CO₂, CH₄, N₂O i halougljenika.



Slika 12
Ukupni radijativni forsing od 1750 do 2000.

Naravno da je veoma izazovno prosto sabrati najbolje procene pozitivnih uticaja i od toga oduzeti najbolje procene negativnih uticaja i na taj način dobiti nekakav pokazatelj neto efekta. Nažalost, suviše pitanja ostaje bez odgovora i ne opravdava kombinovanje radijativnog forsinga pojedinih komponenti u jedinstven numerički zbir, ali bi možda jedan nekvantitativan, vizuelni prikaz mogao da posluži svrsi. Slika 13 namerno izostavlja brojke a pokušava da stvori predstavu o neto uticajima.



Slika 13

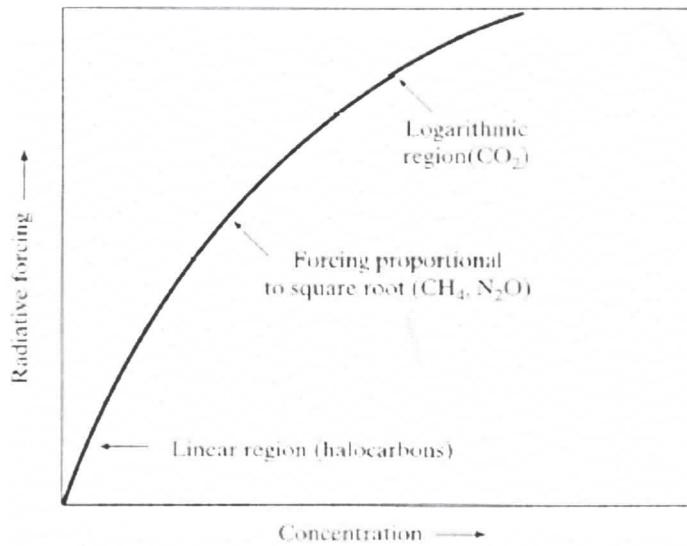
Oduzimanjem negativnog radijativnog forsinga od pozitivnog dobija se neto snaga, ali koju je teško kvantifikovati.

1.3.3. Efekti zasićenja radijativnih forsinga

Radijativni forsing zbirnog iznosa nekog gasa staklene bašte zavisi od talasne dužine koju gas ima tendenciju da apsorbuje i u kojoj meri postojeće koncentracije već apsorbuju te talase. Prvi faktor se odnosi na to da li apsorpaciona talasna dužina spada u okvir atmosferskog prozora između $7 \mu\text{m}$ i $12 \mu\text{m}$. Gas staklene bašte čiji pojas apsorpcije se nalazi unutar prozora je mnogo jači od gasova kod kojih to nije slučaj. Drugi faktor se zasniva na predstavi da apsorpcija može da se približi zasićenju, što znači da svaki novi dodatak u atmosferu ima sve manji i manji uticaj.

Verovatnoća da neko zračenje biva apsorbовано je funkcija koncentracije gasa staklene bašte i razdaljine koju radijacija mora da prevali na svom putu kroz atmosferu. Ovo sugerise da bi odnos između radijativnog forsinga i koncentracije gasa staklene bašte trebao da bude linearan i da bi mogao da izgleda otprilike kao na slici 14.

Za gasove koji postoje u niskim koncentracijama, kao što su halougljenici, apsorpcija je direktno proporcionalna koncentraciji. Udvostručavanje koncentracije udvostručava apsorpciju. Kako koncentracije rastu, apsorpcija u sve većoj meri postaje nelinearna. Pri niskim koncentracijama radijativni forsing je linearan, dok pri višim koncentracijama efekti saturacije postaju evidentni. Na primer, CH_4 i N_2O se nalaze negde na sredini grafikona, i apsorpcija je otprilike proporcionalna kvadratnom korenu koncentracije. I konačno, kada je koncentracija već visoka, kao u slučaju CO_2 , apsorpcija ima tendenciju da raste kao logaritam koncentracije.



Slika 14
Radijativni forsing za gasove staklene bašte.

Ukoliko radijativni forsing izrazimo kao funkciju koncentracije na sledeći način:

$$F=f(C) \quad (1.7)$$

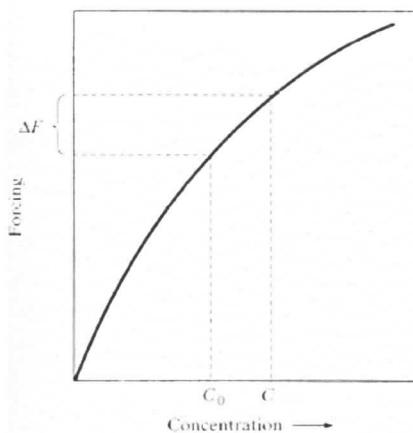
gde je C koncentracija, onda, kako se vidi na slici 15, zbirna promena koncentracije od C_0 do C , daje zbirnu promenu radijativnog forsinga:

$$\Delta F = f(C) - f(C_0) \quad (1.8)$$

Za tri regije specificirane na slici 14, promene koncentracije će dati sledeće promene u forsiranju:

$$\Delta F = k_1(C - C_0) \quad (1.9)$$

$$\Delta F = k_2(\sqrt{C} - \sqrt{C_0}) \quad (1.10)$$



Slika 15

Ova slika ilustruje promenu radijativnog forsinga povezanog sa promenom koncentracije gasova staklene bašte.

$$\Delta F = k_3 (\ln C - \ln C_0) = k_3 \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \quad (1.11)$$

gde su k_1 , k_2 , i k_3 koeficijenti koje treba utvrditi za svaki gas.

Jednačina (1.9) i (1.10) pretpostavljaju da su forsiranja CH_4 i N_2O međusobno nezavisna, odnosno da promene koncentracije jednog gasa ne utiču na funkciju forsiranja drugog gasa. To bi bio slučaj kada se njihove talasne dužine apsorpcije ne bi poklapale. U stvarnosti, kako se vidi na slici 1, kod talasnih dužina apsorpcije za CH_4 i N_2O postoji preklapanje, tako da povećanje koncentracije jednog od gasova povećava efekat zasićenja drugog gasa. Pažljivija analiza (IPCC, 1990) uzima u obzir i faktore preklapanja. Ovi koeficijenti mogu se dobiti izvođenjem iz osnovnih principa, na osnovu publikovanih studija.

Ekvivalentna koncentracija CO_2

Veoma često se radijativni forsing s izražava preko *ekvivalentne koncentracije ugljen-dioksida*. Na primer, kada se porede modeli klimatskih promena, uobičajeno je da se porede predikcije modela za radijativni forsing koji odgovara dvostrukom CO_2 u odnosu na predindustrijsko vreme od 278 ppm.

$$\Delta F = 6,3 \ln \frac{(\text{CO}_2)_{\text{equiv}}}{278} \quad (1.12)$$

gde $(\text{CO}_2)_{\text{equiv}}$ predstavlja ekvivalentnu koncentraciju CO_2 (ppm) koja daje forsiranje ΔF u W/m^2 .

1.3.4. Potencijal globalnog zagrevanja

Okvirna konvencija UN o klimatskim promenama iz 1992. godine izražava rešenost "da se spreče opasna antropogena uplitanja u klimatski sistem". Jedan od instrumenata koji je definisan kao pomoć u sprovođenju ove politike je korišćenje jednog indeksa, koji se zove potencijal globalnog zagrevanja (GWP- Global Warming Potential). GWP je ponderisan faktor koji omogućava poređenje između uticaja 1 kg bilo kog gasa staklene bašte na globalno zagrevanje i uticaja 1 kg CO_2 . To je količina bez dimenzija i uključuje vremenski interval u kome će se dotični uticaj osećati. Na primer, 20-godišnji GWP za N_2O iznosi 280, što znači da će 1 kg N_2O koji se emituje danas uzrokovati 280 puta veće globalno zagrevanje tokom narednih 20 godina nego što to čini 1 kg CO_2 emitovan danas. Da to izrazimo malo drugačije, 1 kg N_2O emitovan danas imaće isti uticaj tokom narednih 20 godina kao što bi imalo današnje emitovanje 280 kg CO_2 .

Kada se GWP za svaki gas staklene bašte pomnoži sa stopom emisije za ovu godinu, može se utvrditi prava mera uticaja svakog gasa. Na primer, ako neki proces emituje 1 kg N_2O i 1000 kg CO_2 , 20-godišnje forsiranje tog para biće ekvivalentno $1 \times 280 + 1000 = 1280$ kg CO_2 . N_2O bi na taj način uzrokovao 22 % ukupnog forsiranja ($280 / 1280 = 0,22$).

Uključujući vremenski period, GWP objašnjava veći uticaj koji neki gas sa dužim atmosferskim životnim vekom ima u poređenju sa gasom koji nestaje brzo posle emisije. Na primer, 1 kg CFC-12 u atmosferi i 1 kg HCFC-22 u atmosferi će imati otprilike isti trenutni uticaj na radijativni forsing. Međutim, duži životni vek CFC-12 u atmosferi (102 godine za razliku od 12 godina za HCFC-22) znači da će CFC-12 koji se emituje danas imati uticaj u mnogo dužem vremenskom periodu i to

se onda reflektuje u njihovom potencijalu globalnog zagrevanja GWP. 100-godišnji GWP za CFC-12 iznosi oko 8000, dok GWP za HCFC-22 iznosi "samo" 1700. Ovde treba primetiti da su poređenja laka između svih gasova osim CO₂. U prethodnom primeru, 1 kg CFC-12 koji se emituje danas daje skoro 5 puta veći potencijal GWP za 20 godina nego 1 kg HCFC-22.

Izbor vremenskog perioda zavisi od pitanja koje se u datom kontekstu rešava. Na primer, kraći vremenski interval se može koristiti kada se radi o stopi promene globalne temperature, a ne toliko o krajnjem porastu temperature. Kratak vremenski interval može takođe da bude podesan kada je potrebno definisati najpogodniju strategiju za borbu protiv efekta staklene bašte u slučaju mogućih naglih klimatskih promena nakon što se pređe određeni prag. S druge strane, dugi vremenski interval može da se koristi kod procene strategija za izbegavanje dugih, sporih nereverzibilnih uticaja kao što su promene nivoa mora.

1.3.5. Izračunavanje GWP

Postoje tri osnovna faktora koji utiču na GWP. Prvi je radijativni forsing koji je povezan sa emitovanjem u atmosferu jedinice mase svakog gasa staklene bašte. Drugi faktor je zasnovan na proceni koliko dugo će se gas zadržati u atmosferi. Treći se odnosi na kumulativni radijativni forsing koju jedinica emitovana u atmosferu ima u nekom vremenskom periodu u budućnosti.

GWP je odnos kumulativnog radijativnog forsinga za 1 kg gasa staklene bašte tokom nekog vremenskog perioda u odnosu na isti pokazatelj za neki referentni gas, a ovde je odabранo da to bude ugljen-dioksid, u istom vremenskom periodu. Matematički govoreći, GWP može sa de izrazi kao:

$$GWP = \frac{\int_0^T \Delta F_g R_g(t) dt}{\int_0^T \Delta F_{CO_2} R_{CO_2}(t) dt} \quad (1.13)$$

gde je:

ΔF_g -radijativni forsing gasa staklene bašte po kg

ΔF_{CO_2} -radijativni forsing CO₂ po kg

$R_g(t)$ -deo od 1 kg gasa staklene bašte koji ostaje u atmosferi u vremenu t

$R_{CO_2}(t)$ -deo od 1 kg CO₂ koji ostaje u atmosferi u vremenu t

T - vremenski period za kumulativni efekat (u godinama)

Uz jedan veoma bitan izuzetak CO₂, stopa po kojoj se neki gas staklene bašte uklanja iz atmosfere smatra se proporcionalnim sa količinom prisutnog gasa. Kada je to slučaj, količina koja ostaje u atmosferi nakon emisije 1 kg gasa predstavljena je eksponencijalnom funkcijom raspadanja:

$$R_g(t) = e^{-t/\tau} \quad (1.14)$$

gde vremensku konstantu τ zovemo atmosferski životni vek. Treba primetiti da kada je vreme t = 0, R_g(0) = 1 kg. Integral brojioca iz funkcije 1.13 je sledeći:

$$\int_0^T R_g(t) dt = \int_0^T e^{-t/\tau} dt = \tau(1 - e^{-T/\tau}) \quad (1.15)$$

Tada GWP postaje sledeći:

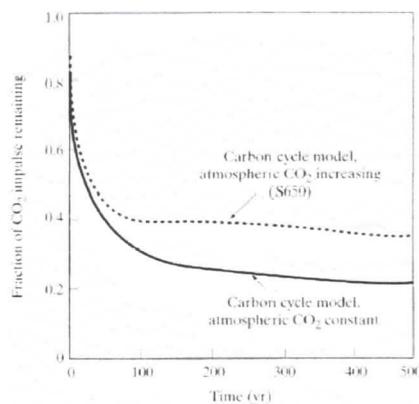
$$GWP = \frac{\tau(1 - e^{-T/\tau})}{\int_0^T R_{CO_2}(t)dt} \quad (1.16)$$

Približne vrednosti integrala impulsnog odgovora CO₂ zasnovane na Bern-ovom modelu sa fiksnim CO₂ (354 ppm)

Vremenski interval u godinama	$\int_0^T R_{CO_2}(t)dt$
20	13.2
100	43.1
500	138.0

Tabela 3

Preostala količina koju treba odrediti predstavlja jedan deo od 1 kg CO₂ koji ostaje u atmosferi kao funkcija vremena – to je R_{CO₂}, iz jednačine (1.16). Ranije je pomenuto da CO₂ ne može da se predstavi prostom eksponencijalnom funkcijom datom u (1.14). Raspadanje je brzo tokom prvih nekoliko decenija dok biosfera apsorbuje ugljenik, a onda sledećih nekoliko stotina godina on se raspada po mnogo sporijoj stopi koja korespondira sa sporim apsorbovanjem okeana. Da bi stvar bila još komplikovanija, raspadanje dodatno zavisi od prepostavki koje postoje za “pozadinski” CO₂. Na slici 16 prikazane su dve krivulje za R_{CO₂}: jedna predstavlja atmosferu u kojoj je koncentracija CO₂ neizmenjena, a druga predstavlja realniju sliku atmosfere u kojoj CO₂ dostiže koncentraciju od 650 ppm do godine 2200. Pošto GWP zavisi od ponašanja CO₂, različite prepostavke o stopi raspadanja daju i različite procene za GWP. Obično se koristi stopa raspadanja koja korespondira sa promenljivom koncentracijom CO₂, ali postoje različita mišljenja o tome šta je prikladnije.



Slika 16

Impulsni odgovor na ubacivanje 1 kg CO₂ u atmosferu; to je R_{CO₂}(t). Puna linija predstavlja atmosferu u kojoj je koncentracija CO₂ konstantna; isprekidana linija je za atmosferu koja se stabilizuje na 650 ppm CO₂ do 2200 god. (Izvor: IPCC, 1995)

Tabela 4 prikazuje vrednosti GWP za različite hemikalije u širokoj upotrebi. Kao što se može videti, sve ove vrste imaju veoma visok GWP u odnosu na CO₂ jer se sve apsorbuju u atmosferskom prozoru. Međutim, većina tih gasova su halougljenici, a oni sadrže atome hlora ili broma koji mogu da uništavaju ozon u stratosferi. Taj dodatni efekat uništenja ozona može da poništi značajan deo direktnog pozitivnog zagrevanja usled halougljenika. Jedinjenja sa bromom, uključujući halone i metil bromide CH₃Br, su tako efikasne u uništavanju ozona u stratosferi da je njihov neto efekat forsiranja negativan – odnosno, oni deluju tako što rashlađuju atmosferu (IPCC, 1995).

Jedinjenje	Hemiska formula	Životni vek(god)	Snaga po jedinici mase u odnosu na CO₂ ΔFs/ΔF_{CO₂}	GWP u odnosu na buduće koncentracije CO₂		
				Potencijal globalnog zagrevanja(vremenski interval u godinama)	20	100
Ugljen-dioksid	CO ₂		1	1	1	1
Metan	CH ₄	12,2	58	56	21	6,5
Azot dioksid	N ₂ O	120	206	280	310	170
CFC-11	CFCI ₃	50	3970	5000	4000	1400
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	102	5750	7900	8500	4200
CFC-113	CF ₂ CICFCI ₂	85	3692	5000	5000	2300
CFC-114	CF ₂ CICF ₂ CI	300	4685	6900	9300	8300
HCFC-22	CF ₂ HCl	13,3	5440	4300	1700	520
HCFC-141b	CH ₃ CFCI ₂	9,4	2898	1800	630	200
HCFC-142b	CH ₃ CF ₂ Cl	18,4	4446	4200	2000	630
HCFC-134a	CF ₃ CH ₂ F	14,6	4129	3400	1300	420
HCFC-32	CH ₂ F ₂	5,6	5240	2100	650	200
H-1301	CF ₃ Br	65	4724	6200	5600	2200
Metilhloroform	CH ₃ CCl ₃	5,4	913	3600	110	35
Ugljeniktetrahlorid	CCl ₄	42	1627	2000	1400	500

Tabela 4

Takođe treba obratiti pažnju na specijalni slučaj metana. Direktno pozitivno forsiranje metana pospešuje se preko njegovog indirektnog uticaja. Kako je već pominjano, metan u stratosferu dodaje vodena isparenja i ozon, čime uzrokuje dodatno pozitivno forsiranje. Cilj GWP je da oceni relativnu važnost različitih emisija, što znači da GWP za svaki gas treba pomnožiti sa stopom emisije za taj gas.

2. Uloga procesa povratnih sprega

U cilju procene klimatskih promena, zbog porasta koncentracije gasova staklene bašte, koriste se različiti klimatski modeli. Najjednostavniji su: *modeli globalnog bilansa energije i jednodimenzioni radijativno-konvektivni modeli*.

Schlesinger i Mitchell (1987) su ukratko prikazali prognozirane površinske temperature, koje su dobijene različitim radijativno-konvektivnim modelima sa dvostrukom koncentracijom CO₂. Kao što je prikazano u tabeli 5, sve vrednosti srednjih globalnih anomalija površinskih temperatura su pozitivne i u opsegu od 0,48°C do 4,2°C.

Reference	ΔT_s (°C)
Manabe i Wetherald (1967)	1.33-2.92
Manabe (1971)	1.9
Augustsson i Ramanathan (1977)	1.98-3.2
Rowntree i Walker (1977)	0.78-2.76
Hunt i Wells (1979)	1.82-2.2
Wang i Stone (1980)	2.00-4.20
Charlock (1981)	1.58-2.25
Hansen et al. (1981)	1.22-3.5
Hummel i Kuhn (1981 a)	0.79-1.94
Hummel i Kuhn (1981 b)	0.8-1.2
Hummel i Reck (1981)	1.71-2.05
Hunt (1981)	0.69-1.82
Wang et al. (1981)	1.47-2.8
Hummel (1981)	1.29-1.83
Lindzen et al. (1982)	1.46-1.93
Lal i Ramanathan (1984)	1.8-2.4
Somerville i Remer (1984)	0.48-1.74

Tabela 5.

Promene površinske temperature usled udvostručene koncentracije CO₂ koje su izračunate pomoću selektivnog radijativno-konvektivnog modela.

Ove veličine zavise od prirode formulacije radijativno-konvektivnih modela, naročito od povećanja i slabljenja radijacije pomoću pozitivnih i negativnih procesa povratnih sprega kao odgovora na porast CO₂. Mnogi procesi povratne veze ne mogu da budu adekvatno predstavljeni u jednodimenzionom modelu. Stoga, od *trodimenzionih modela* (3D) *opšte cirkulacije* se traži da daju kvantitativnu procenu efekta povratnih sprega. Neke od važnih povratnih sprega su zbog:

- promene sadržaja vodene pare,
- promene površinskog albeda,
- okeanske cirkulacije,
- oblaka,
- biohemičkih procesa,
- disanja /respiracije biljaka i fotosinteze.

2.1. Povratne sprege zbog vodene pare

Kao što je već ranije rečeno, vodena para je glavni gas staklene bašte. Ona u znatnoj meri apsorbuje Sunčeve zračenje i Zemljino izračivanje. Na taj način, kao radijativno aktivan gas, ima veliki uticaj na toplotne uslove u troposferi i u površinskom sloju Zemlje. Stoga, svaka promena u njenoj koncentraciji bi kao odgovor na zagrevanje atmosfere ostalim gasovima staklene bašte znatno izmenila neto dobit u toplotnoj energiji. Zbog pojačanog zagrevanja staklene bašte došlo bi do porasta temperature atmosfere i okeana, a usled toga i isparavanja vode sa okeanskih i kopnenih površina. Povećan sadržaj vodene pare u atmosferi izaziva dalji porast temperature usled čega se još više intenzivira proces isparavanja.

Postoje i druge povratne sprege koje su povezane sa visokim sadržajem vlage. Tako, mogu se formirati oblaci koji kroz interakciju sa zračenjem mogu da dovedu do zagrevanja ili hlađenja atmosfere. Zatim, kako se vodena para kondenzuje u oblacima, oslobađa se latentna toplota, koja dalje zagreva atmosferu. Sve ovo je navelo naučnike, koji su zastupali jednodimenzioni model da prepostavde da relativna vlažnost atmosfere ostaje konstantna jer će i temperatura i sadržaj vlage da porastu usled zagrevanja staklene bašte (Möller, 1963; Manabe i Wetherald, 1967; Ramanathan, 1981). Simulacija povratne sprege zbog vodene pare u modelima opšte cirkulacije zahteva realne modele budžeta površinske hidrologije (padavine i isparavanje sa površine kopna i okeana). Reagovanja različitih modela opšte cirkulacije u simuliranju budžeta površinske energije su nejednaka, a primarni uzrok tome je povezan sa formulacijama hidrološkog ciklusa u njima (Randall et al., 1992). Na primer, fluks vlage sa površine okeana je funkcija njegove površinske temperature isto kao i jačine prizemnog vetra. Tako, u tropskim oblastima zbog visoke temperature površine okeana postoji povećano isparavanje vode, dok u oblastima slabih vetrova, kao što je intertropska zona konvergencije, postoje slabi vertikalni fluksevi vlage. Uz to, za povratnu spregu zbog vodene pare presudna je i vertikalna raspodela vlage u srednjim i višim slojevima troposfere. Ovo je povezano ne samo sa lokalnim konvektivnim transportom već i sa regionalnom cirkulacijom, kao što je Hadleyeva i Walkerova cirkulacija (Philander). Ova poslednja se uspostavlja u ekvatorijalnom delu Pacifika, od zapadne obale Južne Amerike pa do zapadnih delova Indonezije. Hadleyevom i Walkerovom cirkulacionom ćelijom i horizontalno i vertikalno se transportuje vodena para preko velikih udaljenosti. Prema tome, dok povratna sprega vodene pare može da pojača srednje globalno zagrevanje vazduha, razmatranje realnih povratnih sprega zbog oblaka i reakcija okeanske /atmosferske cirkulacije zahteva više iskustva u simuliranju reagovanja klime nego što je moguće u današnjim modelima.

2.2. Povratne sprege zbog površinskog albeda

Promene u površinskom snegu i ledenom pokrivaču su najviše proučavane povratne sprege u zagrevanju staklene bašte, dok su druge povratne sprege površinskog albeda povezane sa promenama biljnog pokrivača.

Albedo je odbijanje /reflektovanje Sunčevog zračenja od Zemljine površine i računa se po formuli:

$$A = \frac{I_r}{I} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Znači, to je odnos između količine reflektovane Sunčeve energije (I_r) i količine one energije koja dođe do Zemljine površine (I). Ovaj odnos se izražava u procenama.

Povratna sprega zbog albeda leda dovodi se u vezu sa topljenjem morskog leda i snežnog pokrivača usled zagrevanja staklene baštne. Sneg i led reflektuju Sunčevu zračenje znatno više nego otvorena površina vode ili golo tlo, ili tlo pokriveno vegetacijom. Međutim, usled pojačanog zagrevanja planete očekuje se da se ledeni pokrivač na moru znatno smanji, da dođe do prevremenog sezonskog topljenja snega i do povlačenja glečera. Ceni se da će ovi efekti povećati zagrevanje staklene baštne u globalnom iznosu za 10% do 20% (Hansen et al., 1986; Lian i Cess, 1977). Nesigurnosti u modeliranju povratne sprege zbog albeda leda povezane su sa razlikama između albeda starog i novog snega, kao i albeda debelog i tankog morskog leda. Problemi se pojavljuju i u simuliranju jakog uticaja okeanske cirkulacije na snežni i ledeni morski pokrivač. Uz to, oblačni pokrivač može da prikrije promene albeda nastale zbog povećane ili smanjene količine snega i morskog leda, a porast padavina u višim širinama može da poveća snežni pokrivač čak iako se zagrevanje događa. Na primer, postoje indikacije da promene u raspodeli oblaka, udružene sa promenama snežnog pokrivača mogu da proizvedu suprotan znak ove povratne sprege (Cess et al., 1991). Takođe i promene u albedu snega, u pošumljenim oblastima, mogu da budu delimično prikrivene.

Još složenija povratna sprega zbog površinskog albeda je u vezi sa promenama biljnog pokrivača. Ako bi se granica severne tundre pomerila ka Severnom polu, kao odgovor na zagrevanje planete, to bi dovelo do smanjenja albeda i predstavljalo bi pozitivnu povratnu spregu. Sa druge strane, ako bi se zbog redukcije kiše pustinje proširile u polutropskim oblastima, onda bi to moglo da stvori negativni efekat. Takođe je moguće da će povećana koncentracija ugljen-dioksida da izazove povećanje biljnog pokrivača (King et al., 1985; Houghton, 1987; 1988; Idiso, 1988), a rezultat toga je smanjenje albeda i pozitivna povratna sprega. Povećanje biomase, tj biljnog rastinja na Zemlji i okeanu, bi znatno smanjilo sadržaj ugljenika u atmosferi. Cooper (1988.) je pretpostavio da ako je šumsko rastinje ograničeno indeksom listanja za datu oblast i transportom vlage, onda biljni pokrivač ne može da raste sa ugljen-dioksidom. Dakle, zbog toga što je povratna sprega površinske vegetacije u jakoj vezi sa celim hidrološkim odgovorom, čija je glavna nesigurnost u geofizičkoj povratnoj spredi, ona može imati i pozitivno i negativno povećanje u znaku staklene baštne sa nepoznatom amplitudom.

2.3. Povratne sprege zbog okeana

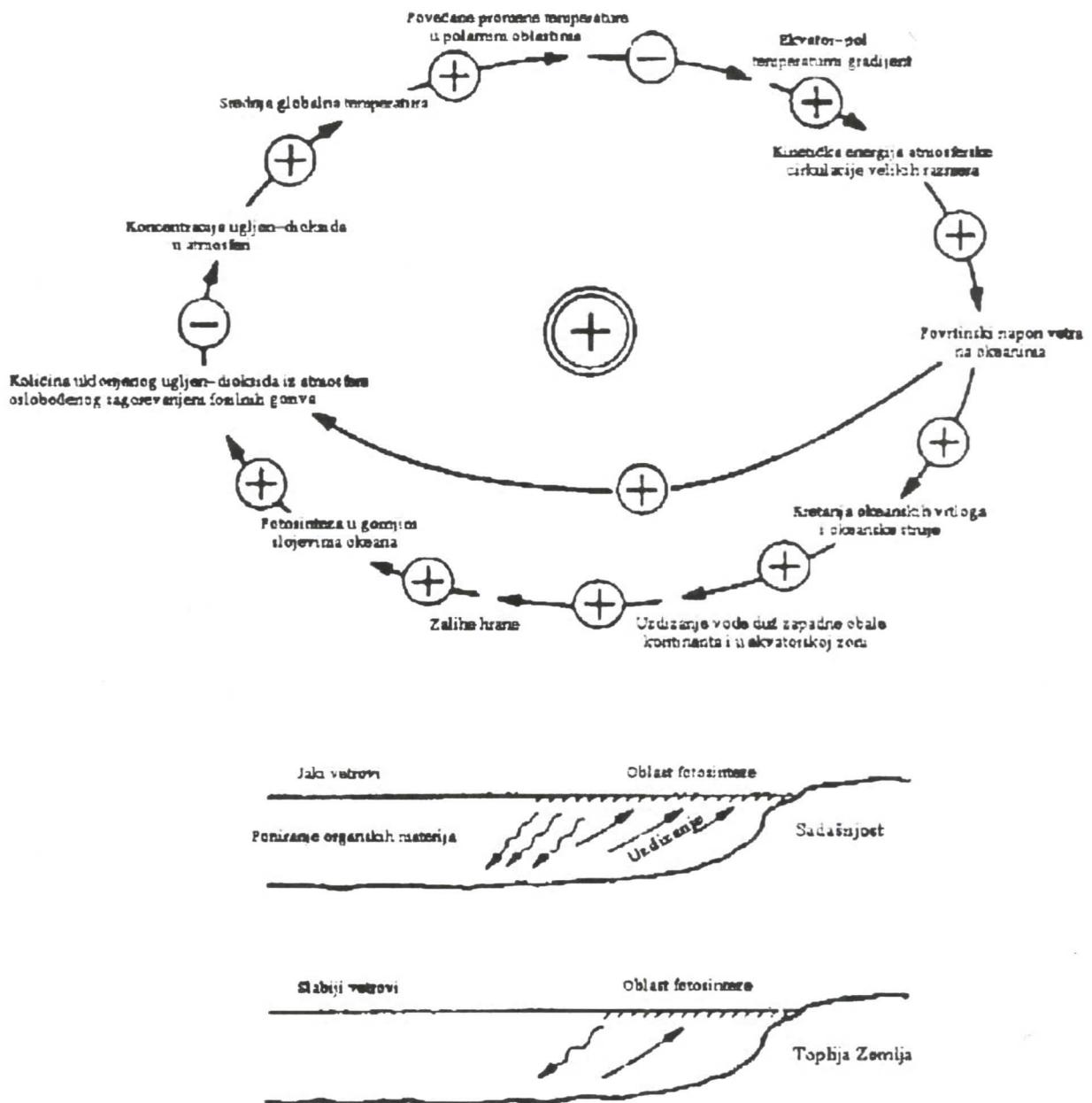
Povratne sprege zbog okeana deluju gotovo u svim aspektima klimatskih promena, od globalnih ka regionalnim odgovorima.

Kao što je ranije pomenuto, kao odgovor na zagrevanje atmosfere dolazi do promene okeanske cirkulacije. To snažno utiče na amplitudu vlažnosti i povratnu spregu zbog albeda leda. Zahvaljujući velikom zapreminskom toplotnom kapacitetu, koji je tri do četiri puta veći nego kod sastavnih delova površinskog sloja kopna i zbog još nekih drugih fizičkih osobina po kojima se razlikuje od njega, površinski sloj vode se sa približno istom količinom toplotne energije sporije zagreva i hlađi. Kao rezultat toga, vreme koje je potrebno da sistem atmosfera-okean odgovori na zagrevanje staklene baštne je uveliko kontrolisano reagovanjem okeana. Ako je razmena toplotne sa dubljim slojevima okeana mala, onda će gornji izmešani sloj, koji je dubine 70 do 100 m, reagovati na zagrevanje atmosfere u vremenu od nekoliko decenija. Ukoliko je ova razmena veća, biće potrebno vreme reda veka ili više

gornjim slojevima okeana da primetno odreaguju na zagrevanje staklene bašte. To će znatno odužiti vreme za koje će zagrevanje staklene bašte biti otkriveno u sistemu Zemlja-atmosfera. Procene intenziteta razmene toplove sa dubokim slojevima okeana napravljene su ispitujući prenos pasivnih materija, kao što su radioaktivne supstance, u duboke slojeve okeana. Problem sa ovim pristupom je što toplota nije pasivna, već ona izaziva promene u stratifikaciji okeana, koje utiču na vertikalni prenos toplove između površinskih i dubljih slojeva. Zatim, razmena toplove zavisi i od jačine vetrova. Kada duvaju jaki stalni vetrovi onda oni mogu na okeanima i velikim morima da izazovu strujanje vodenih masa u onom pravcu kuda vetar duva. Što su vetrovi jači i postojaniji tim će se i strujanje okeanske vode obrazovati do većih dubina, pa će i okeanske struje biti jače. Pored toga, ravnotežni odgovori modela opšte cirkulacije na zadati dvostruki ili četvorostruki porast ugljen-dioksida zavise od načina na koji su modeli opšte cirkulacije povezani sa okeanom. Prema tome, promena srednje površinske temperature za zadatu dvostruku koncentraciju CO_2 , varira od $0,2^\circ \text{C}$ za model sa ne interaktivnim okeanom, do $3,5\text{-}4,1^\circ \text{C}$ za model sa izmešanim slojem okeana (Schlesinger, 1983).

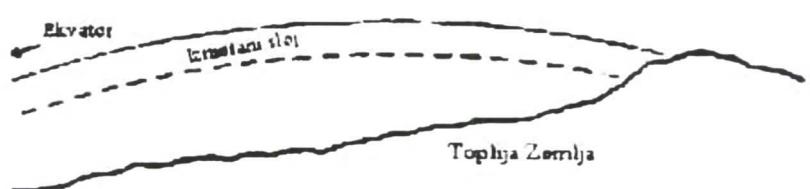
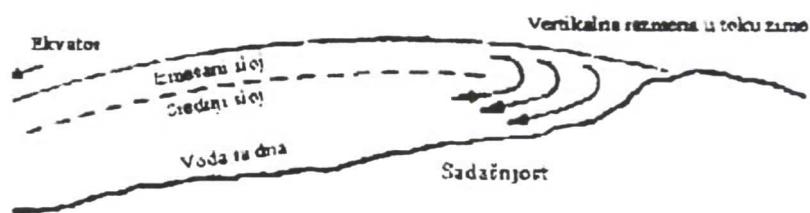
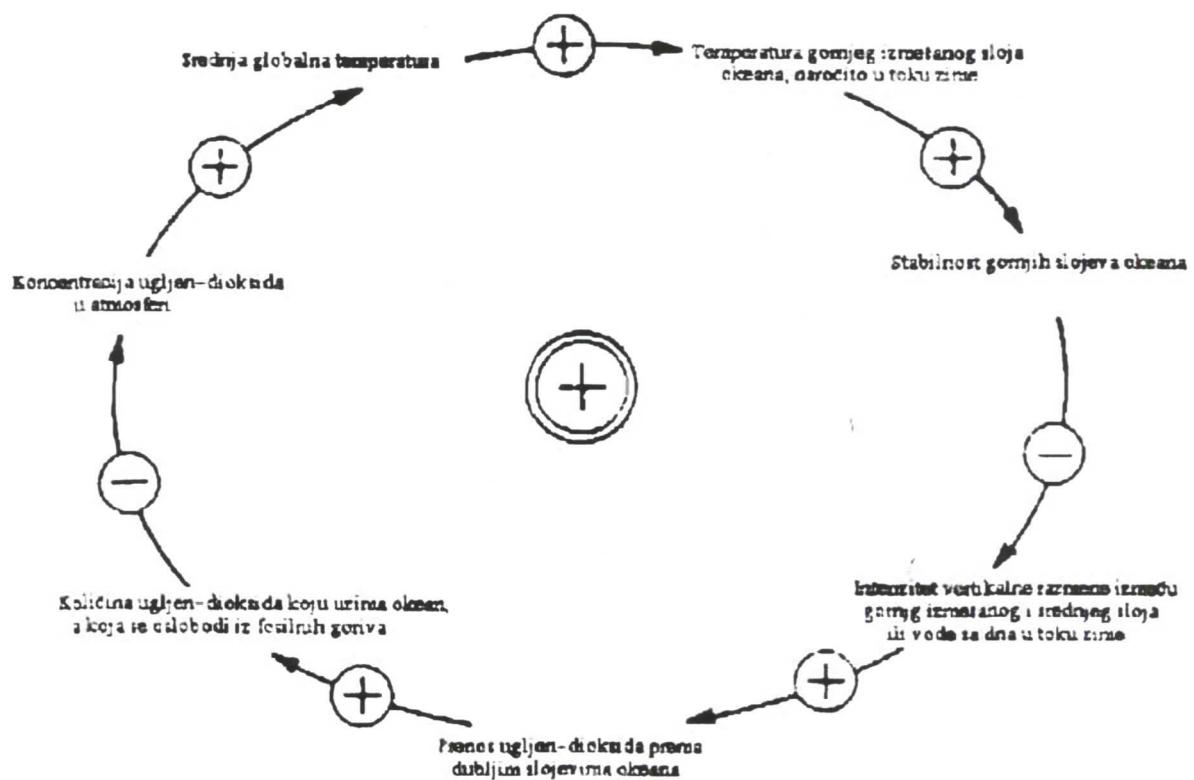
Okean nije samo veliki rezervoar toplove već je i veliki rezervoar CO_2 . Sadrži količinu ugljen-dioksida koja je pedeset puta veća od one koja se nalazi u atmosferi. Najjednostavnija povratna spregu je da, kako se okean zagreva, rastvorljivost CO_2 se smanjuje a njegova veća količina se oslobađa iz okeana u atmosferu stvarajući pozitivnu povratnu spregu. Kellogg (1983) je razmatrao neke od komplikovanih petlji povratne spregre uključujući okeansku cirkulaciju i ugljen-dioksid. Jedna od tih petlji, prikazana na slici 17, pokazuje da ako atmosferska cirkulacija oslabi u tropskim oblastima, kao što je simulirano nekim modelima opšte cirkulacije, onda će izdizanje vode iz dubljih slojeva okeana prema površini da oslabi. Oskudan dovod hranljivih sastojaka iz dubljih slojeva okeana oslabiće fotosintezu, koja će smanjiti prenos CO_2 iz atmosfere u okean. Ovo bi stvorilo *pozitivnu povratnu spregu*.

Drugi pretpostavljeni lanac događaja, prikazan na slici 18, je u vezi sa intenzitetom vertikalne razmene morske vode u višim geografskim širinama. Ako bi se u tim širinama, kao što je predloženo nekim modelima (e.g., Manabe i Wetherald, 1980), gornji slojevi okeana zagrevali u toku zime, tada bi stabilnost okeana porasla a vertikalna razmena površinskih slojeva mora sa dubljim slojevima okeana, tj silazno strujanje bi se smanjilo. Kako je količina ugljen-dioksida, koju okean uzima iz atmosfere kontrolisana intenzitetom razmene površinskog sloja vode sa dubokom okeanskim vodom, smanjeni intenzitet silaznog kretanja površine vode bi stvorio u zagrejanoj atmosferi *pozitivnu povratnu spregu*, pa bi se u tom slučaju akumulacija CO_2 u atmosferi povećala.



Slika 17

C_O₂-okeanska cirkulacija-petlja povratne sprege zbog uzdizanja dubljih slojeva okeana. Crtež na dnu ilustruje fizičke procese koji su pri tome uključeni.

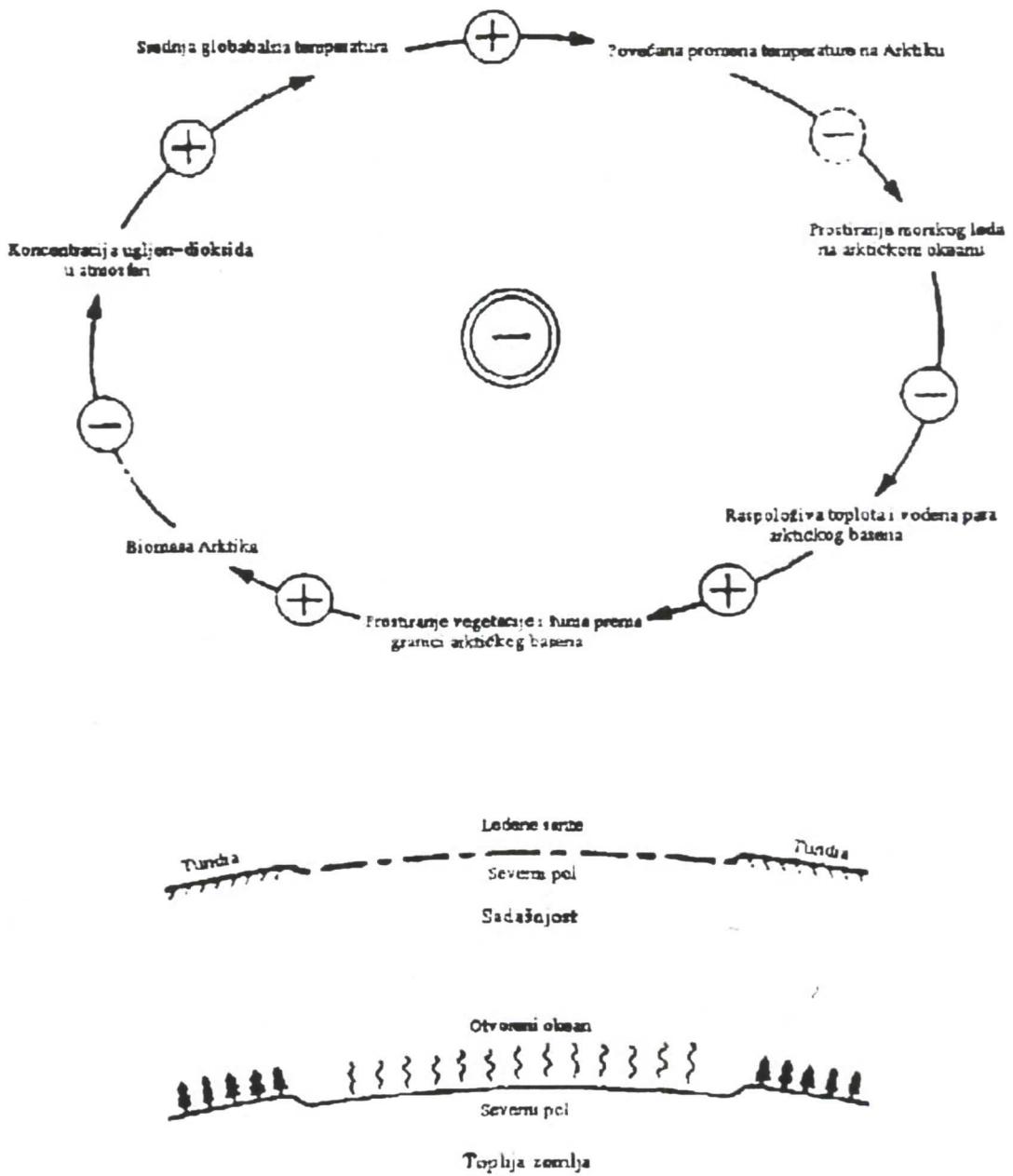


Slika 18

CO₂-stabilnost okeana- zimska silazna petlja povratne sprege. Crtež na dnu ilustruje fizičke procese koji su pri tome uključeni.

Druga moguća povratna sprega, koja uključuje zagrevanje od okeana je povratna sprega zbog albeda od dimetil-sulfida. Prema hipotezi koju je dao Charlson (1987), produkcija dimetil-sulfida će se pojačati iznad toplijih tropskih i suptropskih vodenih površina. Usled toga će se povećati koncentracija jezgra kondenzacije i albedo oblaka. To će stvoriti *negativnu povratnu spregu*. Od tog momenta hipoteza je čisto spekulativna u proceni relativne vlažnosti.

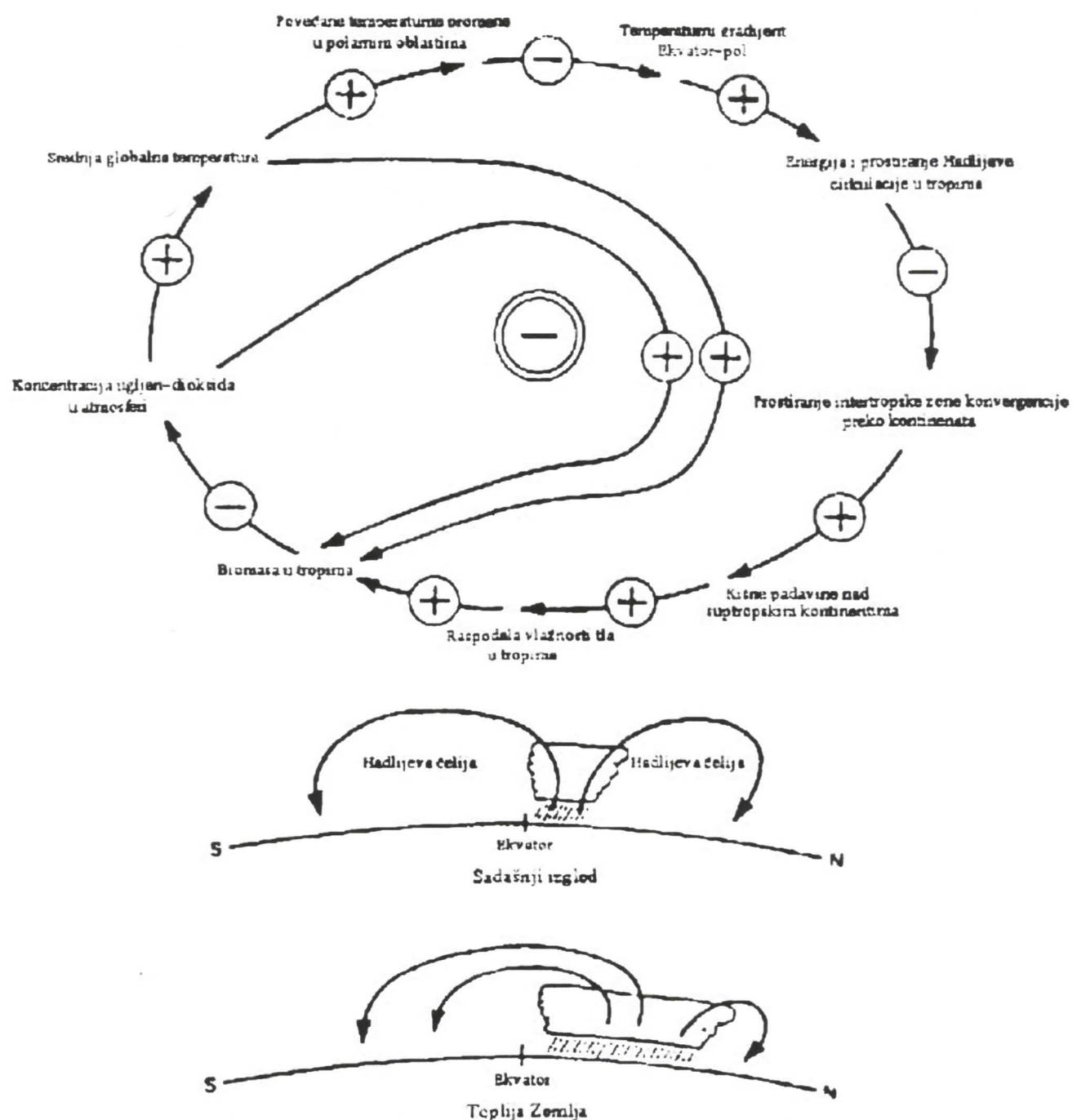
Kellog (1983) je ukratko prikazao nekoliko mogućih povratnih sprega zbog okeana, koje sadrže promene biomase u oblastima Arktika i tropa. To je i prikazano na slikama 19 i 20, respektivno. On pretpostavlja da ako sante leda na Arktiku iščeznu u toku leta, kao odgovor na toplij okean / atmosferu, to će stvoriti umereniju i vlažniju klimu u blizini okeana. Ona će podsticati širenje polarnih šuma koje će povećati potrošnju CO₂ i stvoriti *negativnu povratnu spregu*.



Slika 19

C₀₂-arktički morski led-petljani povratni spregi biomase na Arktiku. Crtež na dnu ilustruje fizičke procese koji su pri tome uključeni.

Ovo su primeri mogućih petlji povratne sprege u vezi sa reagovanjem okeana na zagrevanje staklene bašte. Neke od povratnih sprega su pozitivne, neke negativne, a nekim je teško odrediti znak. Pored toga, teško je dati kvantitativnu procenu bilo koje od ovih petlji povratne sprege koje su povezane sa budžetom CO₂ što predstavlja znatnu nesigurnost u predviđanju dugoročnih trendova nivoa ugljen-dioksida u atmosferi. Termodinamičke i hidrodinamičke povratne sprega zbog okeana usled porasta CO₂ su dosta predvidljive, ali zahtevaju komplikovane atmosfersko-okeanske modele opšte cirkulacije, koji su još uvek u ranoj fazi upotrebe.



Slika 20
 CO_2 – raspodela kišnih padavina-petlja povratne sprege tropске biomase

2. 4. Povratne sprege zbog oblaka

Jedna od glavnih pozitivnih povratnih sprega usled zagrevanja staklene bašte je porast fluksa vodene pare sa površine okeana i tla u atmosferu. U atmosferi bez oblaka, povećani sadržaj vodene pare izazvao bi još jače zagrevanje staklene bašte, a kao odgovor na veću vlagu u vazduhu mogao bi da se očekuje porast oblačnog prekrivača, veća vodnost ili optička debljina oblaka. Zatim, oblaci delimično menjaju stabilnost atmosfere zbog latentne topote koja se oslobađa pri kondenzaciji vodene pare i zbog njihove povezanosti sa uzlaznim i silaznim kretanjima, vertikalnim i horizontalnim prenosom topote, vlage, momenta, raznih čestica i gasova u atmosferi. U ovom delu ćemo ispitati povratnu spregu zbog radijacije od oblaka, kao i povratnu spregu povezану са променама у транспорту ваздушних маса и променама стабилности atmosfere.

Otkriveno je da srednja globalna radijacija visokih oblaka doprinosi zagrevanju atmosfere, zatim da je niski oblaci hладе, dok srednji balansiraju između hlađenja refleksijom sunčevog zračenja i zagrevanja apsorpcijom dugotalsnog zračenja. Usrednjjen preko cele Zemlje, albedo oblaka je malo veći nego njihovo zagrevanje staklene bašte, pa proizilazi da oblaci radijativno hладе atmosferu u poređenju sa Zemljom bez oblaka (Ramanathan et al., 1989). Ovde treba imati u vidu da su oblaci forsirani relativno malim atmosferskim kretanjima, tako da klimatski modeli moraju da parametrizuju oblake na veoma grub način, sa oblačnim pokrivačem koji je određen na osnovu klimatologije ili parametrizovan kao funkcija relativne vlažnosti i kao nusprodukt konvektivnih parametrizacionih šema. Čak i u prefinjenijim modelima opšte cirkulacije, koji imaju prognostičku jednačinu za tečnu vodu ili količinu ledene vode u oblaku, horizontalno i vertikalno razlaganje nije dovoljno da simulira glavna uzlazna kretanja koja dovode do formiranja oblaka. Kao rezultat toga, simulirane povratne sprege zbog oblaka variraju od modela do modela u zavisnosti od prirode oblaka ili radijativne šeme i rezolucije u modelima. Na primer, Hansen (1984) je pronašao da su oblaci, u simulacijama sa povećanom koncentracijom ugljen-dioksida doprinosili zagrevanju staklene bašte, dok su Manabe i Wetherald (1980) pronašli da su promene oblaka u njihovim modelima opšte cirkulacije imale mali efekat na budžet globalne radijacije. Kasnije (1986; 1988), su otkrili da u njihovim simulacijama sa povećanim sadržajem CO₂, oblaci proizvode *pozitivnu povratnu spregu*. Uzrok ove povratne sprege je bila:

- smanjena količina oblaka od srednjih ka višim slojevima troposfere, povećana količina oblaka oko tropopauze i
- povećana količina oblaka u blizini Zemljine površine u višim geografskim širinama.

Njihovi rezultati uveliko zavise od sposobnosti šeme za parametrizaciju kumulusa, pošto je povratna spregu uveliko rezultat predviđenog porasta količine visokih oblaka kao odgovora na povećano zagrevanje vazduha konvekcijom u tropskim i srednjim širinama. Sa druge strane, konvektivno zagrevanje izaziva vertikalnu promenu relativno stabilnog sloja vazduha sa visinom na mestu gde iz konvektivnih tornjeva ističe vlažan vazduh. Na žalost, parametrizacija kumulusa ostaje kao jedna od najnesigurnijih parametrizacija u modelima opšte cirkulacije i drugim numeričkim prognostičkim modelima.

Gore pomenuta proučavanja nisu uzela u obzir moguće promene tečne vode oblaka kao odgovora na povećanu koncentraciju gasova staklene bašte. Petukhov (1975), Paltridge (1980) i Charlock (1981; 1982) uzeli su u obzir moguće promene tečnog sadržaja oblaka i pronašli su da oblaci izazivaju *negativne povratne sprege*.

Koristeći empirijska proučavanja, koja ukazuju na to da sadržaj tečne vode raste sa temperaturom vazduha, Somerville i Remer (1984) su, na osnovu srednjeg globalnog radijativno-konvektivnog modela, dobili da oblaci služe kao termostat za stabilizovanje klime suprotno radijativnom forsingu, poput onog izazvanog gasovima staklene bašte. Ne uključujući promene optičke debljine oblaka, izračunali su da bi dvostruki sadržaj ugljen-dioksida povećao temperaturu za $1,74^{\circ}\text{C}$. Kada su uključili i povratnu spregu zbog optičke debljine oblaka, amplituda zagrevanja je opala za manje od $0,5^{\circ}\text{C}$. Oni nisu uključili visoke tanke ciruse, čija bi reakcija na zagrevanje ili oslabila ili pojačala amplitudu negativne povratne sprege oblaka zavisno od njihove optičke debljine. Randall sa saradnicima (1989.) je primetio da *cumulusi capillatusi* (gornji deo razvučen u nakovanj) vrše veoma snažan uticaj na tropsku konvekciju preko radijacije, kojom destabilizuju gornje slojeve troposfere i preko apsorpcije dugotalasnog zračenja Zemlje. Oni su zaključili da veština u predviđanju ovih oblaka u modelima opšte cirkulacije dok je kvalitativno korektna, nije dovoljno tačna da bi se na nju kvantitativno oslonilo u razmatranju njihovog jakog uticaja na simuliranje klime. Njihov zaključak je delimično opravдан kada uzima u obzir važnu ulogu koju organizovani sistemi mezorazmera igraju u proizvodnji oblaka tipa *cumulus capillatus*. Ovi sistemi proizvode velike oblasti optički debelih stratiformnih oblaka, kao odgovor na isticanje uzdižućeg vlažnog vazduha iz dubokih konvektivnih tornjeva i proizvode oblačne formacije u sporom uzlaznom kretanju mezorazmera. Sadašnje šeme za parametrizaciju oblaka u modelima opšte cirkulacije ne razmatraju organizovana kretanja mezorazmera u proceni *cumulus capillatus*.

Zatim, treba imati u vidu da konvektivni oblaci nisu uniformno raspoređeni tokom njihovog dnevnog ciklusa. Na primer, neki oblačni sistemi, kao što su konvektivni kompleksi mezorazmera i tropski kumulusi vrste *humilis* pokazuju dobro definisan noćni maksimum (Cotton i Anthes, 1989). Prema tome, ako topliji okean stvara više tropskih grozdastih oblaka onda bi njihov konačni uticaj izazvao *pozitivnu povratnu spregu* pre nego delovanje kao termostat. Usled toga oni bi imali mali efekat na solarnu radijaciju. Ovo je važno zbog razmatranja dnevnih promena oblačnosti kada se ispituje uticaj oblaka na klimu. U drugoj studiji, Roecker sa saradnicima (1987) je poremetio model opšte cirkulacije jednim eksplisitnim hidrološkim sadržajem, koji uključuje prognoziranje tečne vode u oblacima usled porasta solarne konstante. Poput Somervillea i Remera, oni su pronašli da promene tečne vode u toplijoj atmosferi stvaraju jaku *negativnu povratnu spregu* na površinske temperature.

Jedna od najotvorenijih kritika teorije staklene bašte potiče od Lindzena (1990). On smatra da očigledna složnost naučne zajednice po pitanju efekata, koje gasovi staklene bašte imaju na klimu, nije zdrava za meteorologiju niti društvo u celini. Kao dokaz Lindzen navodi da se efekat staklene bašte, na osnovu zabeleženih temperatura, ne može razlikovati od prirodne varijabilnosti i da je teorija pogrešna s obzirom na postupak sa oblacima. Osnova njegovog teoretskog razmatranja je da je modeliranje gornjeg nivoa oblačnog pokrivača pogrešno. On je zaključio da bi duboki konvektivni oblaci dovodili do sušenja gornje troposfere zbog silaznog kompenzacionog kretanja. Svoje obrazloženje bazirao je na ponašanju jednostavnih šema za parametrizaciju kumulusa, koje je sam razvio. I dok efekti sušenja zbog supersidencije zaista zauzimaju važno mesto u srednjoj troposferi, čini se da efekti vlaženja zbog isticanja vodenog sadržaja iz kumulusnih tornjeva i stratiformnih oblaka oblika nakovnja konvektivnog sistema mezorazmera, prevazilaze efekte

sušenja. Kao rezultat toga, uočeno je vlaženje viših slojeva troposfere koje je povezano sa dubokom konvekcijom.

Drugu značajnu povratnu spregu oblaka pretpostavili su Mitchell i saradnici (1989). Oni su, pomoću svog modela opšte cirkulacije, izveli dve simulacije odgovora na udvostručen sadržaj ugljen-dioksida i to:

- koristeći procedure zajedničke za modele opšte cirkulacije u kojima je prisutnost oblaka određena relativnom vlažnosti u modelu, ali su putanje tečne vode određene iz klimatoloških podataka;
- simulacija koja koristi tečni sadržaj oblaka, koji je eksplicitno predviđen uključujući jednostavnu parametrizaciju ledene faze padavina.

Otkrili su da je srednje globalno površinsko zagrevanje, zbog udvostručenog sadržaja CO₂, bilo redukovano sa 5,2 °C na 2,7 °C kada se tečna voda prognozirala. Ova jaka *negativna povratna sprega* je bila povezana sa smanjenim izlučivanjem oblačnog sadržaja zbog redukcije ledenih padavinskih formacija u srednjim širinama. Kao rezultat toga, oblačni pokrivač se povećao i jači albedo je izazvao smanjeni intenzitet zagrevanja efektom staklene bašte nego u verziji modela, koji koristi relativnu vlažnost kao primarni parametar u određivanju količine oblaka.

Nekoliko istraživača je pokušalo da proceni povratne sprege oblaka u zagrejanom sistemu atmosfera-okean ispitujući povezanost između anomalija temperature površine mora (SST- Sea Surface Temperature) i, promena u oblačnosti i neto budžetu radijacije. Ramanathan i Collins (1991) su ustanovili da su promene oblačnosti i neto zračenja povezane sa pozitivnim SST anomalijama za vreme El Niño-a (1987). Inače, El Niño je termin koji se koristi da opiše fenomen toplog površinskog sloja vode, koji se povremeno javlja u istočnom ekvatorijalnom delu Pacifika duž obala Perua i Ekvadora. Smatra se da se sporedni El Niño pojavljuje na svake dve do tri godine, a glavni na svakih osam do jedanaest godina. Prema novijim istraživanjima El Niño-a ima povratne periode od četiri do pet godina. Kada se pojavi obično traje od 12 do 18 meseci. Dalje su zaključili da je u toplom regionu okeana, gde su SST anomalije bile manje od 27 °C, neto efekat povećanog sadržaja vodene pare i oblačnosti rezultirao u pozitivnom efektu staklene bašte. Međutim, kad su temperature površine mora prešle 27 °C, oni su otkrili da su cirusi, formirani fluksom vodene pare kroz kumulonimbusne oblake u više slojeve troposfere, postali deblji. Kao rezultat toga, sledilo je da oni više reflektuju nego što apsorbuju sunčevu i Zemljino zračenje. Oni su razmatrali mogućnost da se visoko reflektujući optički debeli cirusi ponašaju kao *termostat*, koji ne dozvoljava dalje zagrevanje okeana. Zaključili su da bi porast koncentracije ugljen-dioksida, za više od jednog reda veličine, povećao maksimum temperature površine mora za nekoliko stepeni.

U drugoj studiji, Peterson (1991) je ispitao odnos između anomalija temperature površine mora i anomalija visoke, srednje i niske oblačnosti koristeći pri tome satelitske podatke. Pronašao je da se, preko većeg dela tropske i južne zone konvergencije nad Pacifikom, količina visokih oblaka povećala sa pozitivnim SST anomalijama, dok se u suptropskim stratokumulusnim oblastima niski oblačni pokrivač smanjio.

Zbog toga što se pokrivač optički debljih niskih oblaka smanjio, dok se kod optički tanjih visokih oblaka povećao preko regionala toplih SST, dobio je da srednji neto fluks zračenja u kosmos opada kao odgovor na visoke površinske temperature. Zaključio je da njegovi rezultati daju dokaze da oblaci proizvode *pozitivnu petlju povratne sprega* u globalnom zagrevanju.

U svakoj od ovih studija karakterističan je obrazac razvoja regionalne / opšte cirkulacije kao odgovor na SST anomalije. Cirkulacije, kao što su Hadleyeva i

Walkerova (Philander, 1990) snabdevaju vlagom duboke konvektivne oblake i usled toga su naročito odgovorne za promene oblačnosti. U okviru scenarija o sporom zagrevanju staklene bašte, mogla bi da se očekuju različita reagovanja i okeanske i atmosferske cirkulacije nego u njihovim dosadašnjim proučavanjima. Ne može se sa sigurnošću tvrditi da atmosferska cirkulacija, koja se podudara sa onom koju su razvili Ramanathan i Collin ili Peterson, izvedena na osnovu SST anomalija ima ikakve sličnosti sa onom povezanim sa zagrevanjem staklene bašte. Tako, promene oblačnosti bi mogle da budu potpuno drugačije od njihove raspodele pri sadašnjim klimatskim uslovima, koji su povezani sa anomalijama površinske temperature mora, u slučaju El Niña, ili Petersenovog seta podataka.

Postoje i drugi efekti oblaka koji mogu da stvore pozitivne ili negativne povratne sprege u zagrevanju staklene bašte. Neki od njih su povezani sa promenama stabilnosti troposfere uključujući i visinu tropopauze. Kao odgovor na otopljenje klime, npr. duboka konvekcija će povećati visinu tropopauze u tropima, a to će doprineti njenom hlađenju. Od temperature tropске tropopauze će zavisiti i sadržaj vodene pare u stratosferi. Što je ona hladnija niži je sadržaj vodene pare u stratosferi, jer tropopauza deluje kao poklopac koji sprečava dalja uzlazna kretanja vodene pare. Zbog toga će u stratosferi da postoji slaba apsorpcija IC zračenja. To će se odraziti na površinske temperature, pa će one biti niže. Simuliranje efekta povratne sprege zbog oblaka na promenu klime moglo bi da se smatra "Ahilovom petom" klimatskih modela, jer povratne sprege mogu da budu velike i mogu da smanje uticaj gasova koji doprinose zagrevanju staklene bašte.

2.5. Povratne sprege zbog vegetacije

Ukoliko bi se zbog bogatog sadržaja ugljen-dioksida povećao rast vegetacije, značaj ovog gasa staklene bašte u globalnom zagrevanju bi bio smanjen, dok bi vegetacija imala važnu ulogu u određivanju njegove koncentracije u atmosferi (Leith, 1963).

U vazduhu u zemljinim šupljinama nalaze se ponekad tragovi plemenitih gasova kao što su: helijum, neon, itd. Ustanovljeno je da radioaktivne primese svojim dejstvom podstiču biljke na rast, ukoliko nagomilavanja ovih primesa nisu suviše velika. U manjoj ili većoj količini nalazi se i ugljen-dioksid. On se stvara u prvom redu radom najsitnijih organskih bića koja se nalaze u samom zemljištu. Aktivnost ovih bakterija u zemljištu je utoliko življa, ukoliko im zemljište pruža više hranljivih materija, i ukoliko je zemljište bogatije potrebnom vlagom i topotom. Stajsko đubre uslovjava neprestanu produkciju ugljen-dioksida i bakterija jer se u njemu nalaze dovoljne količine hranljive organske materije. Ali organsko đubrenje dolazi do izražaja samo u vezi sa obilnom topotom i vlagom. Ovo se najbolje ispoljava u tropskim šumama gde ima dosta kiše, u kojima je organsko đubrenje zamenjeno lišćem, koje opada sa drveća. Iznad ovakvog zemljišta, vlažno topli tropski vazduh potpomaže razvoju najgušće vegetacije.

Sem toga, ugljen-dioksid u izvesnoj meri može dolaziti i iz unutrašnjosti Zemlje, ako za ovo postoje povoljni geološki uslovi. Isto tako u vulkanskim predelima, u vazduh slobodne atmosfere stalno dospevaju izvesne količine ugljen-dioksida. Dok biljke primaju ugljen-dioksid iz vazduha atmosfere direktno apsorpcijom lišća, dotle ugljen-dioksid iz vazduha zemljine unutrašnjosti može biljkama da koristi samo zaobilaznim putem. Kao posrednik u ovim važnim procesima javlja se tzv. *disanje zemljišta*, odnosno razmena vazduha između gornjih slojeva zemljišta i prizemnih slojeva atmosfere. Organski ugljenik u tlu, koji je rezultat disanja zemljišta, sadrži

oko 2 /3 ugljenika i ima dosta dugo vreme rezidencije (preko 1000 godina), prema podacima Posta i saradnika (1982).

Scherwood B. Idso sa saradicima, izvodio je eksperimente u laboratoriji i na poljima da bi ispitao kako povećani sadržaj CO₂ u atmosferi utiče na rast biljaka i njihovu plodnost. Otkrio je da je drvo pomorandže znatno poraslo. U toku prve godine rasta u sredini obogaćenoj ugljen-dioksidom, srednji poprečni presek stabla pomorandže bio je za 102% veći nego kod kontrolnih u uslovima sadašnje atmosfere. Posle dve godine rasta, ukupan iznos stabla zajedno sa obimom grana bio je 2,79 puta veći nego kod kontrolnog pomorandžinog drveta. Dr. Kimball je zaključio da će se sa udvostrućenim sadržajem CO₂ plodovi uvećati za oko 33%. Ed Glenn, iz Laboratorije za ispitivanje okoline na univerzitetu u Arizoni, je predložio da se u priobalnim i unutrašnjim zonama posade biljke, koje podnose slani morski vazduh, kao mehanizam koji uklanja ugljen-dioksid iz atmosfere kroz rast vegetacije. Ahmad (1990) je predložio da se površina od 4 650 000 km² u pustinjskim oblastima pošumi. Tada bi drveće za svoj rast uzimalo 2,9 biliona tona CO₂ iz atmosfere, dok bi se snabdevalo vodom iz prostranih podzemnih voda Sahare, Indije i okoline.

2.6. Druge povratne sprege

Postoje i druge povratne sprege koje su povezane sa hemijskim procesima u troposferi i stratosferi i sa biologijom tla. Na primer, u toplijim uslovima na Zemlji vrlo je verovatno da apsolutna vlažnost vazduha bude veća, pa da kao rezultat toga hemijske reakcije, koje zavise od temperature ili vlage, budu neprirodne. Reakcije koje uključuju stvaranje metana i ozona će biti usporene, pa će se i njihove koncentracije smanjiti (Lashof, 1989). Ovo će proizvesti slabu *negativnu povratnu spregu*. Drugi primer je da proračuni klimatskih modela ukazuju da će zagrevanje troposfere da bude povezano sa hlađenjem stratosfere, što će uticati na hemijske reakcije koje su važne za koncentraciju ozona u stratosferi. Na žalost, znak i veličina ovog efekta zavise od visine na kojoj temperatura opada, kao i emisije *halokarbonata i azotnih oksida*. Ni znak ni veličina ovih povratnih sprega ne može biti tačno ocenjena (Ramanathan et al., 1987).

Zatim, povratne sprege zbog vegetacije povezane su sa promenama u albedu vegetacije i sa sadržajem ugljenika. Povećanje travnatih površina i pustinjskih oblasti, kao rezultat promene temperature i količine padavina ili drugih čovekovih aktivnosti u suptropskim oblastima, bi moglo da bude delimična nadoknada za smanjeni albedo u višim širinama (Lashof, 1989). Garatt (1992) je predstavio rezultate modela opšte cirkulacije, prema kojima se kontinentalne padavine u proseku smanjuju za oko 1mm /dan kao odgovor na porast srednjeg albeda za 0,13. Najznačajnije povratne sprege zbog vegetacije za atmosferu su: *evapotranspiracija, vodni bilans u dugim vremenskim periodima i albedo tla* (Gaetz, 1991).

Gledano u globalu, postoje mnoge potencijalne povratne sprege u zagrevanju staklene bašte. Mnoge od njih su po veličini male i neizvesnog znaka. Međutim, sve te povratne sprege, koji su povezane sa vodenom parom, oblacima, okeanima, biosferom i promenama u ledenom / snežnom pokrivaču, nisu male i uvode znatnu nesigurnost u proceni posledica povećanog sadržaja gasova staklene bašte na klimu.

3. Uticaji globalne promene klime na region

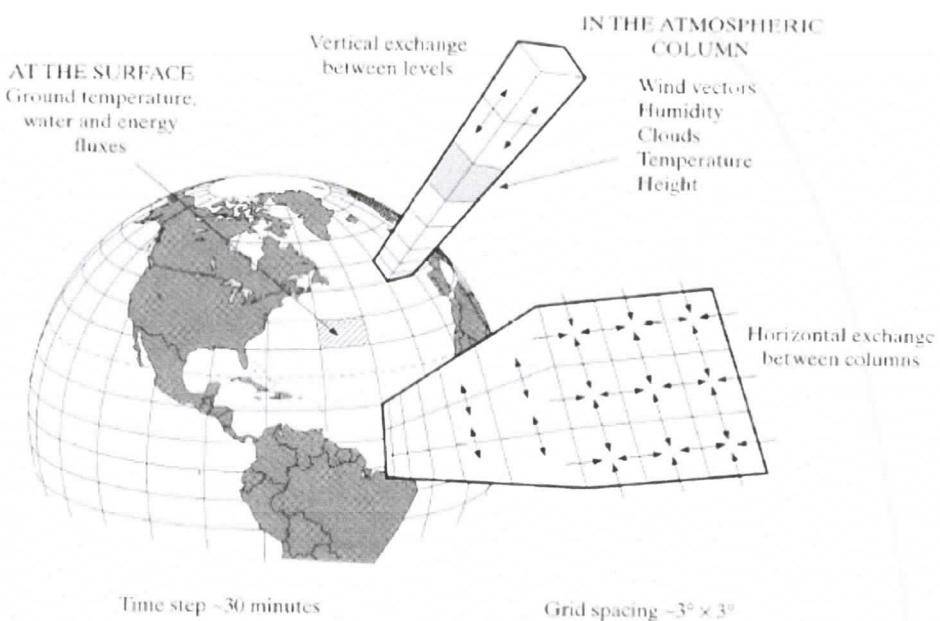
3.1. Reagovanja površinske temperature

Procene uravnoteženog reagovanja klime na povećane koncentracije gasova staklene baštne urađene su sa trenutnim povećanjem njihove koncentracije. Pri tome su se koristile udvostručene koncentracije ugljen-dioksida, a integracijom u modelu dobijalo se stabilno rešenje. Ovo je urađeno sa jednostavnim *jednodimenzionim radijativno-konvektivnim modelima, dvodimenzionim srednjim zonalnim modelima, i trodimenzionim modelima opšte cirkulacije različite složenosti*. Jednodimenzionim radijativno-konvektivnim modelima sa udvostručenom koncentracijom CO₂, dobija se da srednja globalna površinska temperatura raste u opsegu od 0,48°C do 4,20 °C. Procene ravnotežnih odgovora na udvostučenu koncentraciju ugljen-dioksida variraju od 3,5 °C do 5,2 °C za modele opšte cirkulacije kuplovane sa modelima izmešanog okeanskog sloja (Schlesinger and Mitchell, 1987; Wilson and Mitchell, 1987; Cess et al., 1990).

Modeli opšte cirkulacije generalno daju veće promene površinske temperature na udvostučenu koncentraciju CO₂, nego jednodimenzioni modeli zbog jake povratne sprege od albeda leda i porasta vlage. Uključivanje komplikovane povratne sprege zbog oblaka je skoro prepovoljilo procenjenu ravnotežu reagovanja površinske temperature na udvostučenu koncentraciju ugljen-dioksida (Mitchell i saradnici, 1989).

3.2. Regionalni uticaj temperaturnih promena

Relativno jednostavni modeli koji će biti predstavljeni u sledećem poglavlju su korisni kod izrade procena prosečnih globalnih površinskih temperatura, ali su regionalni uticaji globalnog zagrevanja mnogo važniji i mnogo ih je teže predvideti. Polazna tačka u proceni regionalnih promena se daje trodimenzionim opštim cikrulacionim modelom GCM (General Circulation Model), koji može da pokaže kako parametri kao što su temperatura, oblačni pokrivač, vlažnost zemljišta, ili ledeni pokrivač variraju zavisno od geografskog položaja i doba godine. Najčešći atmosferski 3D modeli zasnovani su na kartezijanskoj šemi u kojoj je atmosfera podeljena na celije kako je pokazano na slici 21. Svaka celija, koja može imati bočno oko 1 km i 250 km dubine, okarakterisana je preko više varijabli kao što su temperatura, vlažnost, pritisak, oblačnost itd. Te celije tada matematički komuniciraju sa susednim atmosferskim celijama i podaci za njih se ažuriraju nekim zbirnim vremenskim pokazateljima. Visoko razvijeni modeli ove vrste uzimaju u obzir okeane, morski led, i kopnene površine.



Slika 21

Kartezijanski (pravougaoni) sistem u kome se horizontalna i vertikalna promena odvijaju između susednih kolona i nivoa. (Izvor: Henderson – Sellers and McGuffie, 1987)

Nezavisno od svoje kompleksnosti, upareni atmosfera/okean GCM modeli nisu u stanju da predvide vreme u narednih nekoliko nedelja, meseci ili godina (mada mogu dobro da rade vremensku prognozu za nekoliko dana), ali se veruje da mogu da predvide najvažnije statističke parametre buduće klime. S obzirom da su parametri raspoređeni u čelijama, ovi modeli ne mogu da uzmu u obzir klimatske varijacije koje se dešavaju unutar svake pojedinačne čelije. I dalje postoji ogromna neizvesnost u odnosu na ključne faktore kao što su odgovarajući način da se predstave oblaci i njihove radijativne osobine, sparivanje okeanskih i atmosferskih cirkulacionih modela, i biološki procesi na površini Zemlje. Bez obzira na ove slabosti, poverenje u ove modele sve više raste jer se oni usavršavaju.

Upareni atmosferski-okeanski modeli koji uključuju uticaj aerosola kao i uticaj gasova staklene bašte prikazuju sledeće osnovne klimatske promene u budućnosti (IPCC, 2007):

- generalno veće zagrevanje zemljишta nego okeana u zimskom periodu,
- najmanje zagrevanje oko Antarktika i u severnom delu Severnog Atlanskog okeana zbog promena u dubinskom okeanskom mešanju u tim oblastima,
- najveće zagrevanje u visokim severnim geografskim širinama u kasnu jesen i zimi usled smanjenog morskog leda i snežnog pokrivača,
- malo zagrevanje iznad Arktika tokom leta,
- smanjenje dnevног temperaturnog opsega iznad zemlje u većini godišnjih doba i u većini regija,
- pojačan globalni hidrološki ciklus,
- povećan obim padavina u višim geografskim širinama tokom zime,

- povećan broj klimatskih pojava sa izuzetno visokim temperaturama i smanjen broj pojava sa izuzetno niskim temperaturama,
- ozbiljniji vetrovi i ili poplave na nekim mestima ali manje ozbiljni na drugim mestima.

3.3. Rekonstrukcije iz paleoklima

Keilogg (1982) je dao jedan primer istraživanja regionalnih odgovora na zagrevanje staklene bašte preko proučavanja perioda veoma visokih temperatura, koji se odigrao pre 4500 do 8000 godina. U toku tog perioda veći deo Zemlje bio je nekoliko stepeni toplij. Koristeći raspodelu raznih vrsta polena i spora, pronađenih u drevnim jezerima i močvarnom talogu, ispitujući nivoe vode u jezerima i tokove struje, Kellogg (1977) i Butzer (1980) su, odvojeno jedan od drugog, ustanovili područja sa padavinama iznad i ispod normale. I dok se njihove analize nisu medusobno slagale u brojnim oblastima na Zemlji, one su se složile da je u centralnoj Severnoj Americi preovladavala suvija, a u Meksiku, severnoj i istočnoj Africi, većem delu Indije i zapadne Australije vlažnija klima. Pored nesigurnih podataka o klimi, koji su dobijeni indirektnom tehnikom, glavni problem u vezi upotrebe ove tehnike je što glavna pokretačka sila za globalno zagrevanje mora da bude potpuno drugačija nego ona izazvana sadašnjim povećanjem koncentracija gasova staklene bašte. Stoga, promene u regionalnoj podeli klime mogli bi da budu potpuno drugačije ukoliko je zagrevanje izazvano promenama u parametrima Zemljine orbite ili smanjenom vulkanskom aktivnošću, itd.

3.4. Regionalne procene modela opšte cirkulacije

Još jedan pristup u proceni efekta zagrevanja staklene bašte na region je da se ispitaju regionalna polja temperature, padavina i vlažnosti tla, koja su simulirana modelima opšte cirkulacije (Dickinson, 1991; Giorgi i Mearns, 1991) zajedno sa regionalnim promenama zaliha ugljenika u tlu i vegetaciji (Burke et al., 1991). Tipični modeli opšte cirkulacije imaju mreže reda 300 do 400 km. Ovo znači da su pojave pouzdano modelirane na razmerama 1200 do 1600 km i više (Pielke, 1984). Prema tome, modeli su sposobni da opišu pojave na razmerama kontinenta ili eventualno potkontinentalnim razmerama, mada se pouzdanost tako simuliranih podataka stavlja pod znak pitanja, odnosno, pouzdanost postaje sve manja od kako je u upotrebi pristup menjanja razmera (koraka u modelima). Osim toga, dok različiti modeli opšte cirkulacije proizvode relativno konzistentne globalno usrednjene i hemisferski usrednjene simulirane temperature i promene padavina, kao odgovor na zagrevanje staklene bašte, oni proizvode značajne razlike na potkontinentalnim razmerama (Grotch, 1988). Predviđanja regionalnih modela su osetljiva na detalje u formulaciji parametrizacije oblaka, formulaciji vlažnosti tla i početnih uslova, na kompjuterske procedure, itd. Mnogi pokušaji u ispitivanju uticaja zagrevanja staklene bašte na region su izvedeni za proračune sa uravnoteženim modelima opšte cirkulacije za udvostučenu koncentraciju ugljen-dioksida. Kuplovani modeli atmosfera-okean proizvode znatno drugačije regionalne odgovore, koji zavise od promena okeanskih struja i dubine vertikalnog prenosa toplote u okeanima. Na polje padavina, u unutrašnjosti kontinenta, snažno utiče transport vlage sa udaljenih okeana poljima cirkulacije.

Izvestan broj naučnika smatra da će zbog zagrevanja staklene bašte temperatura površine mora da poraste, što će imati za posledicu povećanu frekvenciju i intenzitet tropskih ciklona. Emanuel (1987) je pretpostavio da se tropski cikloni ponašaju kao Karooova toplotna mašina, u kojoj je jačina oluje u velikoj meri kontrolisana

površinskim temperaturama mora i temperaturom na vrhu oluje. Kako se od zagrevanja staklene bašte očekuje da poveća temperaturu površine mora, a od izdizanja tropске tropopauze pad temperature na vrhu oluje u tropima, on je smatrao da bi zagrevanje staklene bašte produžilo pad centralnog pritiska ili povećalo intenzitet tropskih ciklona. Na osnovu osmatranja je poznato da je potreban određen prag temperature površine mora (najmanje 27°C) pre formiranja tropskih ciklona (Merrill, 1988). Međutim, veza između temperature površine mora i intenziteta oluje nije jednoznačna jer ima mnogo drugih okolnih faktora koji deluju na intenzitet i frekvenciju oluje (Anthes, 1982; Cotton, 1990; Pielke, 1990).

Broccoli i Manabe (1990) su ispitali efekat udvostručene koncentracije CO_2 na frekvenciju, trajanje i broj dana tropskih ciklona ili na poremećaje slične ciklonima u njihovom modelu opšte cirkulacije. Model je puštan sa dve različite rezolucije. Jedna je imala korak $4,5^{\circ}$ do $7,5^{\circ}$ geografske širine – dužine, a druga korak $2,25^{\circ}$ do $3,75^{\circ}$. Dva seta eksperimenta su puštana, jedan sa fiksnom raspodelom oblaka, izvedenom iz klimatske datoteke i drugi u kome je bilo dozvoljeno da količina oblaka varira u skladu sa relativnom vlažnosti u modelu. Optičke osobine oblaka, uključujući putanje tečne vode u oblaku, su bile specificirane. Pokazali su da model može da reprodukuje veliki broj osmotrenih karakteristika tropskih ciklona velikih razmara. Osim toga, mnoge osobine globalne raspodele tropskih ciklona bile su dobro predstavljene mada je znatno manje oluja simulirano u severnom Pacifiku nego što je osmotreno. Oluje su simulirane i u južnom Atlantiku gde nisu uopšte bile osmotrene. To je tako urađeno jer su temperature površine mora ispod kritičnih vrednosti, koje su potrebne da podrže razvoj tropskih ciklona. Otkrili su da su simulirana frekvencija, trajanje i broj olujnih dana bili potpuno drugačiji u eksperimentima sa fiksnim i promenljivim oblakom. U slučaju fiksнog oblaka model predviđa porast frekvencije oluje, trajanja i broja olujnih dana, dok se u eksperimentima sa promenljivim oblakom događa suprotno. Ovaj set numeričkih eksperimenata u modelima opšte cirkulacije pokazuje koliko je teško procenjivati regionalne odgovore na zagrevanje staklene bašte i koliko su oblaci značajni u određivanju takvih odgovora.

Proširenje pristupa u modelu opšte cirkulacije je da se umetne regionalni model u model opšte cirkulacije (Dickinson et al., 1989; Giorgi, 1990). U ovom pristupu se koriste podaci u tačkama mreže modela opšte cirkulacije da bi se specificirali granični uslovi za regionalni model. Na primer, Dickinson je umetnuo 60 km mreže mezorazmernog modela u 500 km mreže modela opšte cirkulacije. Sa svojom višom rezolucijom model mezorazmere je mogao bolje da razlikuje osobine terena i da tako bolje simulira zimske padavine, koje su forsirane orografijom na zapadu SAD. Autori su primetili da su simulirana vlažnost tla i podzemna drenaža (oticanje), za periode integracije od 3 do 5 dana, jako zavisile od početne vlažnosti tla u modelu opšte cirkulacije. Zastupali su ideju da bi možda trebalo da se model mezorazmerra pušta za periode od nekoliko meseci ili duže da bi razvio svoja polja vlažnosti, koja ne zavise od modela opšte cirkulacije. Osim toga, padavine i oblaci koji su simulirani modelom mezorazmerra tako zavise od vlažnosti i polja vertikalnog kretanja, koja daje GCM za vreme toplih sezona i u regionima na koje slabo utiče orografija. Stoga, ako globalni model pravi greške u opštem opisivanju toplotne, vlažnosti i cirkulacije na regionalnim razmerama, onda će model mezorazmerra prouzrokovati višu rezoluciju i još veće greške u svom simuliranom oblaku i poljima padavina. Uz to, zbog veće promenljivosti na regionalnim razmerama ne može se osloniti na pojedinačnu simulaciju regionalnog modela koji odgovara pojedinačnoj simulaciji modela opšte cirkulacije. Mnogo značajnije bi bilo da se najpre sprovede jedan

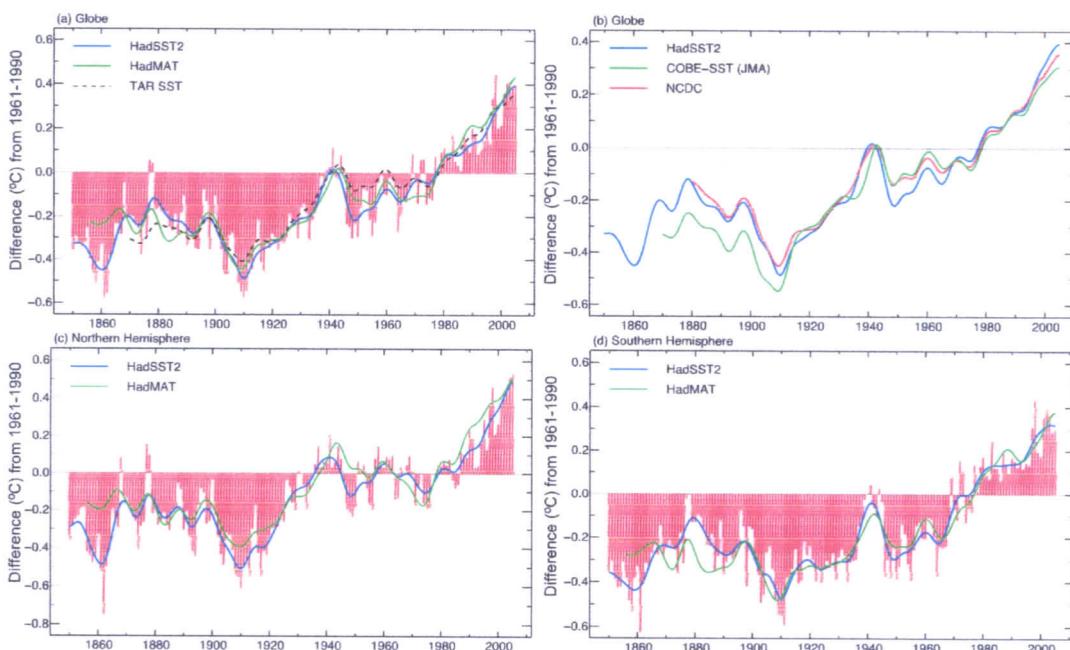
ansambl realizacija GCM u kome je svako početno stanje modela poremećeno malim iznosom, s obzirom na početno polje vlažnosti tla, temperature površine mora, ledenog i snežnog pokrivača i početnih cirkulacija. Svaka simulacija sa poremećenim početnim poljem bi bila realizacija iz koje bi se izračunali podaci usrednjeni po ansamblu velikih razmara.

Uz to, regionalni model bi mogao da se jednosmerno uklopi u podatke na mreži tačaka modela opšte cirkulacije za izabrane periode, koji nas interesuju (zimska sezona posle 30 godina sporog porasta koncentracije CO₂) i ponovo pušta za svaku nezavisnu realizaciju modela opšte cirkulacije. Na ovaj način bi mogao da se na realizacijama modela opšte cirkulacije izvede jedan ansambl odgovora regionalnih razmara, a mogu da se izračunaju srednje vrednosti i varijacije padavina, temperature, itd. regionalnih razmara. Ovo bi pomoglo u određivanju neizvesnosti u procenama regionalnih odgovora na zagrevanje staklene baštne.

Još uvek je veoma teško da se precizno procene uticaji globalne promene klime na region, a stanje stvari u numeričkim prognozama još uvek nije spremno za realne, kvantitativne procene ovih uticaja.

3.5. Izvedene promene u površinskim temperaturama

Na slici 22 prikazane su temperature površine tla kombinovane sa temperaturom površine mora za period od kraja devetnaestog veka do kraja prošlog veka.



Slika 22

Temperature površine tla kombinovane sa temperaturama površine mora u periodu od 1861. do 2000. godine u odnosu na period od 1961. do 1990. godine. Temperatura površine mora je dobijena kao srednja vrednost iz dva seta podataka. (a,b) Cela Zemlja, (c) severna hemisfera, (d) južna hemisfera.

Postavlja se pitanje da li su hemisferske i regionalne promene površinskih temperatura u skladu sa simuliranim odgovorima modela opšte cirkulacije na povećane koncentracije gasova staklene baštne? Kao što je prikazano na slici 22 c i slići 22 d južna hemisfera je pretrpela postepenije poraste srednjih površinskih

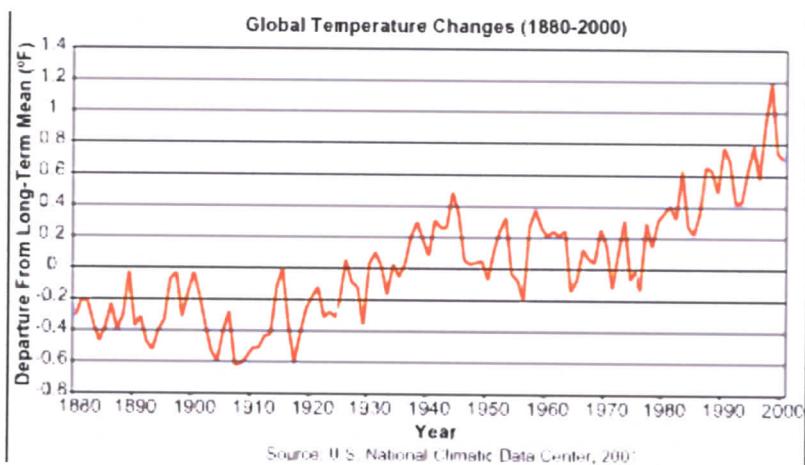
temperatura nego severna hemisfera. Ovo je u skladu sa većom termičkom inercijom okeana južne hemisfere, a ona je posledica njegove veće površine i dubljih vertikalnih mešanja u odnosu na okean severne hemisfere. Kuplovani model okean-atmosfera pretpostavlja da bi južna hemisfera trebala po intenzitetu zagrevanja, koje je izazvano povećanom koncentracijom gasova staklene bašte, da zaostaje za severnom hemisferom.

Veći deo globalnog zagrevanja, koji se odigrao u prošlom veku, dogodio se pre nedavnog porasta koncentracije gasova staklene bašte. Između 1919 -1986. godine srednje globalne temperature su porasle samo za $0,15^{\circ}\text{C}$, a koncentracija gasova staklene bašte je do tada porasla za 30% (Karl et al., 1989). Od 1921-1979. godine srednje globalne temperature površine tla su opale. Na osnovu podataka se pretpostavlja da je Zemlja doživela opšti porast temperature od kraja devetnaestog veka do sada. Iznos zagrevanja za dekadu od 1880-1900. godine i 1980-1990. godine je $0,45^{\circ}\text{C}$. Kombinovane temperature iznad kopna i temperature površine mora severne hemisfere pokazuju nagli porast od 1920-1930. godine, zatim sledi trend ravnomernosti pa tendencija ka zahlađenju od 1940-1976. godine, praćena naglim porastom ka devedesetim godinama. Srednje globalno zagrevanje za severnu hemisferu je $0,42^{\circ}\text{C}$ za ceo period. Suprotno tome, južna hemisfera je pretrpela laganiji porast površinskih temperatura od 1920-1930. godine, zatim je usledio period male promene temperature od 1940. do sredine 1960. godine, a nakon toga postepeni porast temperature ka sadašnjosti. Srednji globalni porast površinske temperature na južnoj hemisferi je $0,48^{\circ}\text{C}$, dakle, nešto veći nego na severnoj hemisferi. Većina naučnika slaže se da je tokom poslednjih 150 godina došlo do podizanja srednje godišnje temperature za $0,45\pm0,15^{\circ}\text{C}$, uz određenu varijabilnost tokom godina. Merenje površinske temperature ukazuje da su od 1990-2000. najtoplja dekada milenijuma na severnoj hemisferi, a 1998. je najtoplja godina. Ova promena je najverovatnije bila pod uticajem El Niño fenomena. 1998. je bila mnogo toplija od 1983 na koju je uticao uporediv El Niño događaj iz 1983. Međutim 1998. je bila između $0,34^{\circ}\text{C}-0,54^{\circ}\text{C}$ toplija nego 1983. tako da se pretpostavlja da je na temperaturu 1983. uticalo hlađenje zbog postojanja aerosola iz vulkanske erupcije vulkana El Chichon . 1999. je bila mnogo hladnija nego 1998. jer je bila pod uticajem La Niña³. Deset najtoplijih godina su se pojavile posle 1980. godine od kojih je šest ili sedam posle 1990. godine. Trend temperature u XX veku pokazuje otopljavanje u tropskim predelima od 1910-1945. Severna hemisfera pokazuje hlađenje od 1946-1975. dok južna hemisfera pokazuje otopljavanje i to u periodu od 1976-2000. Površinska temperatura mora u Severnom Atlantiku raste od sredine 1980. godine. Otopljavanje u mnogim delovima okeana u poslednjih pet godina je ubrzano i doprinelo je prilično rapidnom povećanju površinske temperature u većem delu Evrope. Nove analize pokazuju da je globalni toplotni sadržaj okeana porastao krajem pedesetih godina. Polovina zagrevanja je sadržana u gornjih 300 m i ekvivalentna daljem povećanju temperature. Sa povećanjem minimalne temperature skoro dva puta više nego maksimalne temperature u periodu od 1950-1993. opseg povećanja temperature tokom ovog perioda je 0,2. Efekat hlađenja troposferskih aerosola usporiće zagrevanje i ublažiti povećanje površinske temperature vazduha. Povećanje temperature vazduha biće manje u Severnom Antarktiku i u oblastima Južnog okeana. Sa povećanjem srednje površinske temperature biće češće visokih maksimuma temperature i ređe ekstremno niskih minimalnih temperatura. Nekoliko modela ukazuje da će postojati opadanje u dnevnim površinskim temperaturama u zimu i

³ La Niña smanjuje temperaturu, pojačava se istočni vetar, izaziva sušu zato što imamo manje isparavanje zbog manje količine kiše.

povećanje dnevne temperature u leto na severnoj hemisferi. Predviđanja za 21. vek pokazuju da će klimatske promene srednje temperature porasti za 3°C . Ove promene mogu dovesti do ozbiljnih konsekvenca. Na primer, oblasti u srednjim i visokim geografskim širinama kao što su Amerika, Evropa i Azija mogli da ublaže pojave topotnih talasa poplava i suša kao klimatskih promena.

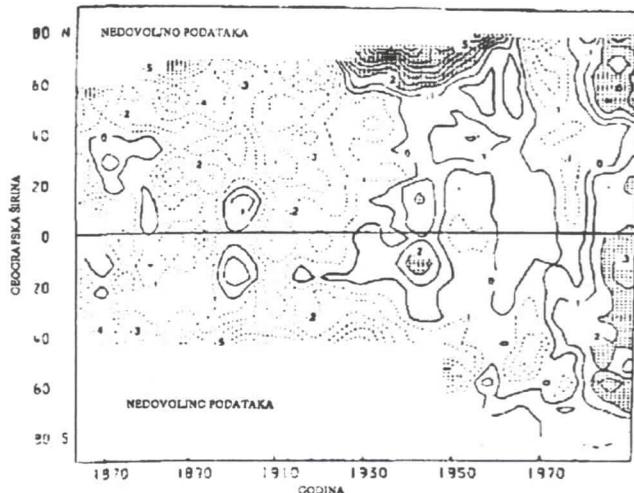
Ako ne uzmemo u obzir brigu o reprezentativnosti senzora i grešaka u uzorcima, postavlja se pitanje da li ovi podaci podržavaju hipoteze o promenama temperature usled antropogeno-izazvanog zagrevanja staklene baštice? Ako koristimo isti nivo objektivnog kriterijuma za procenjivanje uzroka i posledica, koji je se koristio u analizi eksperimenata o zasejavajući oblaka, odgovor je ne! Pre svega, moramo se zapitati da li su tendencije temperature analizirane za period veći nego što su njene prirodne promene? Nažalost, period pouzdanih zapisu skoro da se tačno podudara sa periodom povećane industrijalizacije. Dakle, da bi procenili *prirodne promene* moramo da raspolažemo zapisima o globalnoj temperaturi koji idu u prošlost više vekova i možda čak hiljada godina. Tako, postoji interesovanje da se koriste manje pouzdani podaci, u kojima se tendencije temperature izvode iz analiza paleoklima. Ovi zapisi ukazuju na to da su se srednje površinske temperature, koje su bile veće od sadašnjih, često ponavljale bez ikakvih dokaza o jakom forsiranju ugljen-dioksida (Ellsaesser et al., 1986) slika 23.



Slika 23
Promena globalne prosečne temperature (1880-2000)

Slika 24 ilustruje zonalno usrednjene temperature površine tla i temperature površine mora od oko 1880. godine pa sve do sada. Ona pokazuje kolebanje površinskih temperatura u toku ovog perioda. Od 1920-1940. zagrevanje se dešavalo u mnogim pojasevima izuzev u severnom delu južnog okeana.

Slabo hlađenje je evidentirano od 1950-1970. godine na južnoj hemisferi u umerenim širinama i tropskim regionima. Još jače hlađenje je evidentirano na severnoj hemisferi u toku celog perioda od 1950-1970. Otopljenje se prvo pojavilo na južnoj hemisferi u ranim sedamdesetim godinama i bilo je praćeno zagrevanjem severne hemisfere na svim širinama. Iako postoji neki dokaz da je jače zagrevanje viših širina severne hemisfere povezano sa zagrevanjem južne hemisfere i u skladu sa ravnotežnim odgovorima modela opšte cirkulacije, odgovor nikako nije u skladu sa postepenim porastom kao što bi moglo da se očekuje na osnovu rezultata modela.



Slika 24

Srednje zonalne vrednosti temperature površine tla kombinovane sa temperaturama površine mora od 1861-1989. godine.

3.6. Urbana ostrva topote

Porast temperature na Zemlji od 1979. do danas je $0,19^{\circ}\text{C}$ odnosno $0,26^{\circ}\text{C}$ po dekadi. Satelitska merenja kažu da je porast na većim visinama mnogo manji, samo oko $0,13^{\circ}\text{C}$ po dekadi. To je veliki problem za teoriju staklene baštice jer ona prognozira veći porast temperature u višim slojevima atmosfere nego na površini Zemlje.

Međutim, čak i da zagrevanje nije izazvano efektom staklene baštice već nekim drugim prirodnim faktorom, vrlo je neobično da postoji ovakva razlika. Atmosfera je integrisana celina i zagrevanje bi trebalo da bude relativno ravnomerno raspoređeno po visini. Odakle potiče ova čudna razlika?

Najverovatniji odgovor se krije u problematičnoj prirodi podataka sa Zemlje. Za razliku od pouzdanih satelitskih podataka, oni koji se prikupljaju na Zemlji, zavise od više faktora koji mogu iskriviti pravu sliku. Najvažniji je takozvani "efekat urbanog ostrva topote". Emisija ugljen-dioksida je mnogo veća u gradovima nego van gradskih naselja, i stoga veliki gradovi imaju vrlo snažan lokalni efekat staklene baštice koji ih čini mnogo toplijim od okruženja.

Nesreća sa podacima iz meteoroloških stanica jeste upravo u tome što preko 90% tih podataka potiče iz gradova, i to najčešće velikih gradova, gde je ovaj efekat urbanog ostrva topote najveći. Vrlo je verovatno da je dobar deo porasta temperature koji je tokom XX veka očitan sa stanica na Zemlji dokaz urbanog lokalnog zagrevanja, a ne pouzdan pokazatelj globalnog trenda. Koliki deo porasta temperature od $0,6^{\circ}\text{C}$ i tokom XX veka se može pripisati urbanom efektu nije jasno, ali profesor Balling, jedan od vodećih istraživača ovog pitanja smatra da bi to moglo biti oko jedne trećine. Dakle, po njemu je verovatno da je samo $0,4^{\circ}\text{C}$ realan porast temperature. To bi već bilo više u skladu sa satelitskim podacima, mada ne možemo biti sto posto sigurni, jer se ti podaci prikupljaju tek od 1979. Efekat je možda još veći, ako imamo u vidu da je krajem XX veka ogroman broj seoskih stanica u Istočnoj Evropi ugašen.

IPCC se u svojim projekcijama uvek oslanjao na podatke sa Zemlje. Još gore, u tvrdnji da globalni temperaturni trendovi nisu kontaminirani urbanim efektom, IPCC se poziva na nekoliko studija koje koriste podatke iz Rusije i Kine kao verodostojne. Interesantno je da su kao "nehomogeni" odbačeni podaci sa najpouzdanijih stanica iz Amerike i Zapadne Evrope

koji govore da na tim stanicama ni izbliza nije došlo do tako značajnog zagrevanja kao u gradovima.

Dakle, najverovatniji uzrok čudne pojave da meteorološke stanice pokazuju znatno viši stepen zagrevanja od satelitskih merenja jeste što su podaci sa zemlje kontaminirani efektom urbanog ostrva topote.

3.7. Ostale posledice globalnog otopljavanja

3.7.1. Glečeri i ledene ploče i nivo mora

Planinski glečeri se smanjuju u mnogim delovima sveta mada su naučnici posebno zabrinuti za oblast Aljaske. U tom području je u zadnjih 50 godina nestalo oko 80 kubnih kilometara leda. Glečeri se obično tope kada u toku zime padne manje snega nego što se tokom leta istopi. Količina snega na većini planina Aljaske je znatno smanjena. Računa se da je stvar toliko ozbiljna da čak polovina vode koja usled topljenja ide ka okeanima potiče od topljenja leda na Aljasci.

U martu 2002. javnosti je skrenuta pažnja na pucanje ledene ploče na Antarktiku. Naučnici su bili prilično iznenadeni brzinom kojom se odvajanje događalo. "Komad" leda za koji je procenjeno da teži oko 5000 miliona tona odlomio se od kontinenta i raspao na hiljade manjih santi leda. Eksperti su ovakav ishod predviđeli još pre nekoliko godina ali su i oni bili iznenadeni kada se sve završilo za samo mesec dana. Odvajanje ove ledene mase nije uticalo na nivo mora pošto je i pre odvajanja led plutao na vodi. To nažalost nije uklonilo sumnje naučnika da će buduća odvajanja leda na Antarktiku i drugim mestima imati ozbiljnog uticaja na nivo mora. Temperature su na Antarktiku u proseku porasle znatno više u odnosu na ostatak planete (čak $2,5^{\circ}\text{C}$ za 50 godina) a razlog za to i dalje nije sasvim jasan. Ako se počnu topiti i ledene mase na samom kontinentu tj. kopnenom delu Aljaske, neminovno će doći do drastičnog povećanja nivoa mora. Na primer, ako se potpuno otopi cela ledena masa zapadnog Antarktika nivoi mora će porasti za 5 do 6 metara. Ovakav ishod bi predstavljao kataklizmu globalnih razmara.

Situacija ni u Evropi nije mnogo bolja. Od 1850. godine istopilo se oko polovina ukupne mase leda Alpskih glečera a prognoze kažu da će se do kraja ovog veka istopiti polovina od sadašnje preostale ledene mase. U poslednjih 100 godina nivoi mora su porasli od 10 do 20 cm a predviđa se da će rast nivoa u budućnosti biti još drastičniji.

Tokom ovog veka nivo mora će se podići za 70 cm, da bi u sledećem došlo do konačnog otapanja leda u zapadnom Atlantiku i podizanja nivoa za pet-šest metara. Istraživanja pokazuju da se na Grenlandu debljina ledenog sloja smanjuje brzinom od 0,6 cm godišnje iznad visine od 2000 metara, dok na nižim visinama ta brzina iznosi i do metra godišnje.

3.7.2. Golfska struja

Okeani na Zemlji su neprestano u pokretu. Njihove struje kreću se prilično zamršenim putanjama na koje utiču vetar, salinitet i temperatura vode, oblik okeanskog dna i okretanje Zemlje.

Golfska struja je jedna od najjačih okenaskih struja naše Plave planete. Pokreću je kretanja vetra na površini i razlike u gustini vode ispod površine. Površina vode u severnom Atlantiku se hlađi vetrovima sa Arktikom. Tu voda postaje slanija i gušća pa ponire na dno okeana. Hladna voda se pomera ka ekuatoru gde se polako greje. Golfska struja, da bi zamenila hladnu vodu sa ekvatora pomera vodu iz Meksičkog zaliva ka severu u Atlantik. Golfska struja donosi toplotu na obale zemalja severozapadne Evrope i glavni je razlog što su tamo zime relativno blage (u poređenju sa zemljama iste geografske širine koje se nalaze duboko u Evropskom kontinentu). Prosečna godišnja temperatura na severozapadu Evrope je oko 9°C viša od proseka za ovu geografsku širinu.

Negde pri kraju poslednjeg ledenog doba, kada se topio ledeni pokrivač Severne Amerike, naglo povećanje dotoka sveže vode smanjilo je salinitet površinskih slojeva Atlantskog okeana pa je manje 'guste vode' krenulo ka dnu i pomerilo se ka ekvatoru. Ovo je znatno smanjilo ili sasvim prekinulo toplu struju iz Meksičkog zaliva. Temperature u severozapadnoj Evropi su za samo nekoliko dekada opale za 5 °C.

Najnovija merenja su pokazala da je od 1950. došlo do smanjenja od 20% u protoku hladne vode kroz Faeroe Bank kanal između Grenlanda i Škotske. Ova putanja je jedan od glavnih izvora gušće hladne vode koja pokreće drugu komponentu (baziranu na gustini) Golfske struje. Moguće je da postoji povećan dotok iz drugih izvora hladne vode, ali ako to nije slučaj ovo bi mogao biti početak slabljenja Golfske struje.

Danas je ledena ploča na Grenlandu ''stabilnija'', nego pred kraj poslednjeg Ledenog doba, ali bi globalno povećanje temperature kao i povećanje obima padavina možda dodalo više sveže vode u severni Atlantik, poput situacije pri kraju poslednjeg ledenog doba.

Sadašnji klimatski modeli predviđaju sledeći scenario - ukoliko emisija gasova staklene baštne nastavi da se povećava, komponenta bazirana na gustini vode koja pokreće Golfsku struju će najverovatnije opasti za 25% u narednih 100 godina. Kako Golfska struja bude slabila biće sve nestabilnija pa nije isključeno da u budućnosti potpuno stane.

Osim predviđenog efekta hlađenja i oštrijih zima, pretpostavlja se da bi usled ovog poremećaja došlo i do drugih promena klime u celoj Evropi.

3.7.3 Poljoprivreda i suša

Do 1970. godine prilično 15% zemljine površine bilo je zahvaćeno sušom u nekom datom momentu. Sada ta cifra dostiže i do 30% sa izgledima za pogoršanje.

Poljoprivreda je jako ugrožena pod uticajem klimatskih promena. Mnoge zemlje u razvoju mogle bi izgubiti i preko petine proizvedenih useva što bi moglo imati ozbiljne posledice kada je snabdevanje hrane u pitanju. Cene hrane će skočiti, ukupna proizvodnja žitarica u većini tropskih i suptropskih predela će opasti. U isto vreme visoke temperature negativno će uticati na životinju, a talasi visokih temperatura izazvaće štetu na usevima. Kratkoročno gledano, mali broj razvijenih zemalja mogao bi ostvariti neku dobit zbog globalnog rasta temperatura ali bi preko 90% ovog mogućeg dobitka zahvatilo samo područja Rusije i Kanade. Sve u svemu, na prostoru od Afrike preko Južne Amerike do Azije postoji 40 država koje su „veliki gubitnici“. Te zemlje imaju više od 2 milijarde stanovnika od čega je 450 miliona neuhranjeno.

4. Modeliranje klime

Posao klimatologa je veoma komplikovan i uz najbolje superkompjutere teško je modelirati tako velike i složene sisteme kakav je klimatski sistem Zemlje, a pritom dati dovoljno dobru dugoročnu prognozu njegovog ponašanja. No, zahvaljujući vanrednim naporima, poslednjih godina razvijeni su uspešni modeli klime od kojih je naročit uspeh imao ENSO(El Niño Southern Oscillation) model periodičnog grejanja i hlađenja vode u Istočnom pacifiku, poznatog kao fenomen El Niño – Južne oscilacije. Ovakvi modeli mogu da dovoljno tačno prognoziraju promene temperature i vazdušnog pritiska na velikim prostranstvima tokom dugih perioda, što je omogućilo da se analiziraju budući efekti globalnog zagrevanja i, posebno, rast globalne temperature. Tokom devedesetih učinjeni su brojni napor u ispitivanju trendova globalne i regionalne temperature i oslikavanju temperaturnih promena kroz vreme. Širom sveta razvijeno je 18 različitih računarskih simulacija (zasnovanih na sedam različitih modela klimatskog sistema Zemlje), i sve pokazuju da će rast ugljen-dioksida voditi značajnom podizanju srednje površinske temperature vazduha. Poslednji podaci govore da kada nivo atmosferskog ugljen-dioksida postane udvostručen (oko 500 ppm) u odnosu na predindustrijsko doba, srednje povećanje temperature na Zemlji biće $2,0 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$ (u manje preciznim prognozama $2,8 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$), što se očekuje između 2030. i 2050. godine. Modeli nesumnjivo ukazuju na dva osnovna uzroka globalnog zagrevanja: povišen nivo ugljen-dioksida i seča tropskih šuma. Zato posebno zabrinjavaju merenja u La Selvi i najava da će tropske šume povećati emisiju ugljen-dioksida, jer će to ionako ubrzati već suviše brz proces zagrevanja.

4.1. Vrste klimatskih modela

Klimatski modeli se mogu u osnovi razvrstati u dve grupe: na modele sa parametrizovanom dinamikom i na trodimenzione eksplicitne dinamičke modele. U prvu grupu spadaju modeli termodinamičkog bilansa, modeli sa prenosom impulsa i modeli sa odsečenim talasima. U drugu grupu spadaju numerički modeli koji se koriste za simuliranje opšte cirkulacije atmosfere i u prognozi vremena.

Modeli koji se zasnivaju na jednačinama energetskog bilansa različitih termodinamičkih procesa u klimatskom sistemu, najčešće se koriste za računanje temperature kao osnovne karakteristike klime. U ovim modelima prenos impulsa je isključen. Takvi termodinamički modeli se ponekad zovu "polu-empirijski" (Budiko, 1974) pošto su njihove parametrizacije često izvedene iz empirijskih odnosa. Najprostiji primer modela energetskog bilansa je jednačina koja opisuje ravnotežu zračenja Zemlje. Proširenje jednačine bilansa uključenjem vertikalnih promena fluksa zračenja vodi velikom broju horizontalno usrednjениh jednodimenzionalnih modela. Oni, uglavnom, daju srednje vertikalne profile temperature koji sadrže u sebi razliku između čistog fluksa zračenja i drugih procesa vertikalnog prenosa energije. Termodinamički modeli koji su jednodimenzionalni u horizontalnom pravcu sever-jug, konstruišu se prvenstveno u cilju ispitivanja međusobne veze između širinske promene temperature atmosfere i temperature u funkciji albeda koja figuriše u izrazima za temperaturu površine Zemlje. Dvo- i trodimenzioni termodinamički modeli se konstruišu sa ciljem da se uzmu u obzir međusobna dejstva i povratna sprega raznih komponenata klimatskog sistema. Takvi su obično efekti snega i leda na klimu. Glavna prednost modela termodinamičkog bilansa energije je da su oni relativno ekonomični u računskom vremenu. Dalje, lakše je interpretirati njihove rezultate pošto im je struktura srazmerno jednostavna.

Modeli sa odsečenim talasima spadaju u modele u kojima je efekat baroklinih talasa parametarizovan i modele opšte cirkulacije sa visokim razlaganjem. Takvi modeli imaju za cilj da popune prazninu između eksplicitnih modela sa visokim prostornim razlaganjem i statističko-dinamičkih modela. U takvim "spektralnim" modelima kinetička energija kao i

termodinamička energija je data samo u ograničenim spekralnim opsezima, pomoću izbora izvesnog konačnog broja harmonika. U spektralnom modelu spektar je obično odsečen u razmeri koja odgovara dosta grubom prostornom razlaganju. Ipak, ovi modeli su korisni u izdvajaju efekta pojedinačnog talasa ili nekoliko talasa koji međusobno deluju u klimatskom sistemu.

Eksplizitni dinamički modeli atmosfere (tj. modeli opšte cirkulacije atmosfere) razlikuju se od statističko-dinamičkih modela po tome što se dinamički efekti poremećaja velikih razmara izračunavaju eksplizitno. U takvima modelima ponašanje ciklonskih poremećaja, planetarnih talasa i drugih poremećaja velikih razmara u atmosferi je detaljno praćeno. Eksplizitni modeli se smatraju vrlo korisnim za proučavanje osetljivosti i predvidljivosti klime. Oni se takođe mogu koristiti za kalibraciju parametrizacije statističko-dinamičkih modela. Međutim, jedno važno ograničenje eksplizitnih modela je ogromno računsko vreme potrebno za dugoročne integracije jednačina modela i teškoća u pronalaženju uzroka i efekata koji deluju na klimu.

Osnovne komponente tipičnog modela su dinamički, termodinamički, radijativni i hidrološki procesi. Članovi jednačina koji predstavljaju ove procese računaju se ili pomoću konačnih razlika ili spektralnom metodom. Procesi malih razmara, koji nisu eksplizitno uzeti u obzir u osnovnim jednačinama se parametrizuju. Dosadašnja iskustva su pokazala da su eksplizitni dinamički modeli sposobni da simuliraju izvesne osnovne karakteristike sezonskih promena klime. Tako, npr. uspešno su simulirane lokacije glavnih aridnih oblasti na Zemlji, kao što su Saharska pustinja, Australijska pustinja, pustinja u Centralnoj Aziji i druge. S druge strane, ovi modeli pokazuju nedostatke u blizini strmih planinskih masiva, što traži dodatna istraživanja.

4.1.1. Model topotognog režima

Trebali bismo da dodamo neke kvantitativne informacije jednostavnom dijagramu koji predstavlja efekat staklene bašte na slici 2. Kao što je na slici sugerisano, prikladno je posmatrati Zemlju, njenu atmosferu, i spoljni svemir kao tri odvojene regije. Protok energije između ove tri regije ćemo normalizovati tako što ćemo ih izraziti po jedinici površine Zemlje. Raspoređena po celoj površini Zemlje, prosečna dolazna Sunčeva radijacija jednak je

$$\frac{\text{Upadno Sunčev zračenje}}{\text{Površina Zemlje}} = \frac{S\pi R^2}{4\pi R^2} = \frac{S}{4} = \frac{1370 \text{ W/m}^2}{4} = 342 \text{ W/m}^2$$

S-solarna konstanta [W/m²].

Pošto albedo iznosi 31 %, iznos ulazne radijacije koja se odbija nazad u svemir po metru kvadratnom Zemljine površine iznosi:

$$\frac{\text{Reflektovano Sunčev zračenje}}{\text{Površina Zemlje}} = \frac{S\pi R^2 \alpha}{4\pi R^2} = \frac{S}{4} \times \alpha = 342 \text{ W/m}^2 \times 0,31 = 107 \text{ W/m}^2$$

α – atmosferski albedo.

Od ovih 107 W/m², procenjuje se da se 77 W/m² odbija od same atmosfere, dok se preostalih 30 W/m² odbija od Zemljine površine. Sunčevu energiju koja se ne odbija apsorbuju Zemlja i njena atmosfera. Kada tu apsorbovanu energiju označimo Q_{aps} , dobijamo da je:

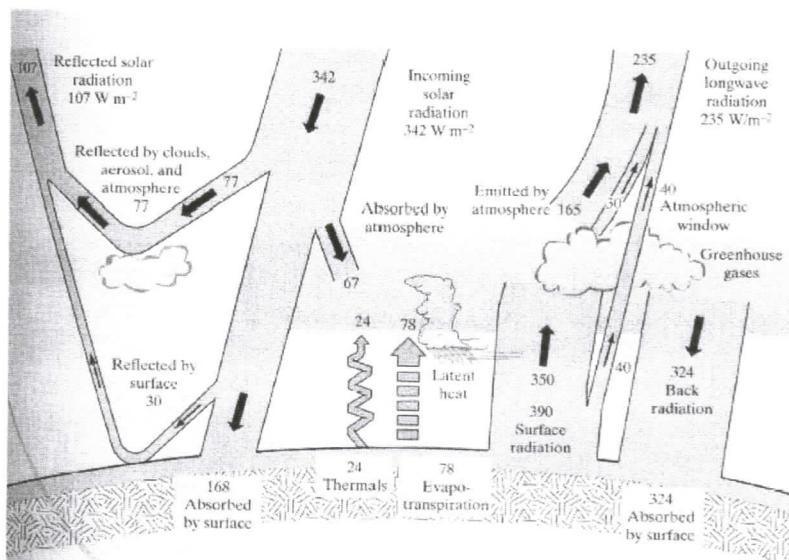
$$\frac{\text{Apsorbovano Sunčev zračenje}}{\text{Površina Zemlje}} = Q_{\text{aps}} = \frac{S\pi R^2 (1-\alpha)}{4\pi R^2} = \frac{S}{4} (1-\alpha) = 342 \text{ W/m}^2 (1-0,31) = 235 \text{ W/m}^2$$

Od tih 235 W/m^2 , 67 W/m^2 apsorbuje atmosfera, a preostalih 168 W/m^2 apsorbuje Zemljina površina.

Ukoliko pretpostavimo da su globalne temperature konstantne u vremenu, onda stopa po kojoj Zemlja i njena atmosfera apsorbuju energiju iz svemira mora da bude jednaka stopi po kojoj se energija vraća u svemir. 107 W/m^2 vraćene energije je već izbalansirano; odnosno, 107 W/m^2 stiže do Zemlje/atmosfere, a 107 W/m^2 se reflektuje nazad u svemir tako da tu komponentu za sada možemo da zanemarimo. Zemlja i njena atmosfera apsorbuju preostalih 235 W/m^2 , tako da ista količina mora da bude odbijena nazad u svemir. Kada bi površina Zemlje bila na 254 K , onda bi Zemlja odbijala 235 W/m^2 , tako da potrebna razlika energije ne bi postojala. Prema tome, da bi se isforsiralo dovoljno energije kroz atmosferu za stvaranje potrebne razlike, temperatura Zemljine površine mora da bude viša od 254 K . Ako Zemlju tretiramo kao crno telo, koristeći Štefan-Bolcmanov zakon možemo proceniti energiju koju Zemlja zrači ka atmosferi. Kada površina Zemlje ima 288 K , ona će zračiti 390 W/m^2 . Samo 40 W/m^2 prolazi direktno kroz atmosferu, uglavnom kroz atmosferski radijativni prozor. Preostalu količinu od 350 W/m^2 apsorbuju gasovi staklene baštice u atmosferi. Nakon toga atmosfera zrači 324 W/m^2 nazad na Zemljiniu površinu.

Takođe postoji prenos topote sa površine u atmosferu putem konvektivnog grejanja i putem isparavanja i kondenzacije vode. Konvekcijom se prenese 24 W/m^2 u atmosferu, dok kondenzacija vodenih isparenja obezbeđuje 78 W/m^2 latentne topote.

Svi ovi tokovi energije su prikazani na slici 25.



Slika 25

Globalni energetski tok između svemira, atmosfere i Zemljine površine. Jedinica je W/m^2 . Vrednosti su preuzete iz IPCC, 1996, Kiehl and Trenberth.

4.1.2. Model širinske raspodele temperature

Ovom vrstom modela se simulira srednja širinska raspodela temperature na Zemlji. Na takvu raspodelu temperature pored zračenja mnogo utiče i horizontalna preraspodela topote u atmosferi i okeanima.

Horizontalni prenos topote u atmosferi i hidrosferi je veoma složen. On se vrši kako uređenim tako i turbulentnim strujanjima, kao i pomoću promene faznih stanja vode u atmosferi i na Zemljinoj površini. To se može predstaviti komponentama toplotnog bilansa sistema Zemlja-atmosfera u obliku jednačine:

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{za} = R_{za} + F_{za} + L(E-r) - B_z \quad (4.1)$$

Ovde je

$$C = F_{za} + L(E - r)$$

tj. količina primljene toplotne pomoću horizontalnih kretanja u atmosferi i hidrosferi.

$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{za}$ - predstavlja količinu toplotne energije koju Zemlja apsorbuje u jedinici vremena po jedinici površine ($\text{kJ m}^{-2} \text{mes}^{-1}$).

R_{za} – radijativni fluks toplotne za ceo sistem Zemlja-atmosfera ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

F_{za} – komponenta toplotnog bilansa koja označava dovod ili odvod toplotne pri horizontalnim kretanjima u atmosferi i hidrosferi ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

$L(E - r)$ je razlika između toplotne utrošene na isparavanje i oslobođene kondenzacijom (pretpostavlja se da je toplota koja se oslobodi kondenzacijom proporcionalna količini padavina izlučenih u jedinici vremena).

Kad se posmatraju srednje godišnje vrednosti onda je B_z u jednačini (4.1) koje označava količinu akumulirane i izračene toplotne, jednak nuli. Otuda sledi da je horizontalni prenos toplotne C uzeto za godinu dana jednak razlici kratkotalsnog i dugotalsnog zračenja, odnosno bilansu zračenja sistema Zemlja-atmosfera. Pošto se bilans zračenja može odrediti pomoću podataka osmatranja ili izračunati, to se može dobiti vrednost za horizontalnu preraspodelu toplotne.

Radi lakšeg izračunavanja vrednosti člana C u jednačini (4.1) Kagan i Vinnikov (1970) su pretpostavili da je horizontalni prenos toplotne duž meridijana u uskoj vezi sa horizontalnom raspodelom srednje temperature troposfere. S obzirom da je razlika temperature vazduha od srednje vertikalne raspodele mala u poređenju sa geografskom promenom temperature, to se može uzeti da je srednja temperatura vazduha u troposferi usko vezana sa temperaturom na Zemljinoj površini. Ova pretpostavka se u potpunosti potvrđuje kad se uzmu srednje mesečne temperature na Zemljinoj površini i na 500 mb nivou za različite geografske oblasti i različita doba godine. Ova pretpostavka omogućuje da se uspostavi veza između horizontalnog prenosa toplotne i raspodele temperature na Zemljinoj površini.

Pošto se prenos toplotne vrši od toplijih ka hladnijim oblastima to se veličina C može smatrati zavisnom od razlike srednje temperature za datu geografsku širinu (t) i srednje planete temperature (t_p). Za potvrdu ove zavisnosti Budiko (1974) je za različite vrednosti $t - t_p$ izračunao odgovarajuće vrednosti R (označava radijativni fluks toplotne za ceo sistem Zemlja-atmosfera).

Koristeći ovu zavisnost i jednačinu (4.1) koja za srednje godišnje vrednosti članova daje $B=0$ i $C=R$, dobijamo

$$Q(1 - \alpha) - I = \beta(t - t_p) \quad (4.2)$$

gde je $\beta = 9,8 \cdot 10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ mes}^{-1} \text{ grad}^{-1}$.

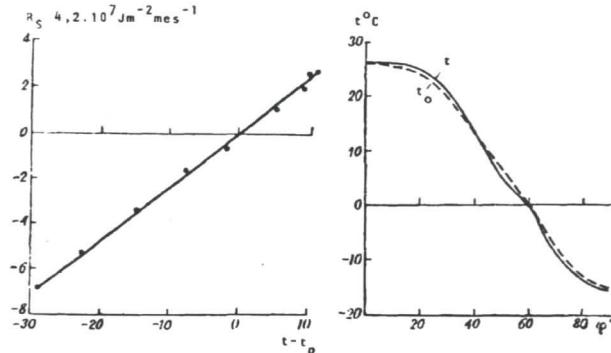
Pomoću jednačina $I = [a + bt - (a_1 + b_1 t)n]C$ i (4.2) može se dobiti jednačina za izračunavanje srednjih godišnjih temperatura na raznim geografskim širinama:

$$t = \frac{Q(1 - \alpha) - a + a_1 n + \beta t_p}{\beta + b - b_1 n}$$

a, a_1, b_1, b – označavaju koeficijente i to: $a = 14,0; b = 0,14; a_1 = 3,0; b_1 = 0,10$; n -oblačnost u desetim delovima jedinice.

Vrednosti temperature dobijenih po ovoj jednačini prikazane su krivom t_o , a izmerene vrednosti krivom t na slici 26. Sa ove slike se jasno vidi da se izračunate i osmotrene vrednosti srednjih temperatura za razne geografske širine sasvim dobro slažu. Ovo slaganje je postignuto modelom sa samo jednim empirijskim parametrom koji zavisi od raspodele temperature. To je koeficijent β koji se smatra nezavisnim od geografske širine.

S obzirom da se albedo za led dosta razlikuje od albeda kopna i mora, moglo bi se očekivati da se u polarnim oblastima javi skok u raspodeli srednjih širinskih temperatura vazduha. Međutima, pošto granica ledenog pokrivača ne prati uporednike već ih oštro seče to je sniženje srednje temperature sa geografskom širinom dosta ravnomerno, kao što pokazuju obe krive na slici 26



a)

b)

Slika 26

- a) Zavisnost meridionalne raspodele toplote od razlike temperatura (Budiko, 1974).
 b) Srednja širinska raspodela temperature vazduha (t_o -izračunata, t -izmerena temperatura)(Budiko, 1974).

4.1.3. Model za različite godišnje doba

Za proučavanje termičkog režima atmosfere u raznim sezonomama Budiko i Vasićeva (1971) su predložili jednačine topotognog bilansa sistema Zemlja-atmosfera u obliku

$$Q_T(1 - \alpha_T) - I_T = C_T + B \quad (4.3)$$

$$Q_H(1 - \alpha_H) - I_H = C_H + B \quad (4.4)$$

U ovim jednačinama B označava prihod ili rashod topline zbog hlađenja ili zagrevanja sistema Zemlja-atmosfera. Praktično se taj član određuje iznosom hlađenja odnosno zagrevanja okeana u razmatranom delu godine. Indeksi T i H označavaju toplo odnosno hladno polugodište.

Članovi I i C u jednačinama (4.3) i (4.4) dobijaju se pomoću jednačina: $I = [a + bt - (a_1 + b_1 t) n]C$, (4.1) i (4.2). U primeni ovih jednačina koriste se srednje širinske temperature za odgovarajuće sezone. Pri tome koeficijent proporcionalnosti β malo se uvećava za hladno i umanjuje za toplo polugodište.

Vrednost za B se dobija iz odnosa:

$$B = S\gamma(t_{wT} - t_{wH})$$

gde je t_w srednja širinska temperatura okeanskih površina za toplu i hladnu polovinu godine. S je odnos površine okeana u dатој širinskoj zoni prema ukupnoj površini širinske zone, γ je koeficijent proporcionalnosti.

Temperatura površine okeana izračunava se iz jednačina topotognog bilansa u obliku

$$R_{wT} = LE_T + P_T + \frac{B}{S} \quad (4.5)$$

$$R_{wH} = LE_H + P_H - \frac{B}{S} + F_o \quad (4.6)$$

U ovim jednačinama je R_w - radijativni bilans površine okeana, LE-gubitak toplote na isparavanje, P - turbulentni prenos toplote između površine okeana i atmosfere, F_o - prenos toplote morskim strujama. Ova poslednja veličina ima velike vrednosti u hladnoj polovini godine, dok je u toploj polovini ona zanemarljiva pa je F_o izostavljeno u jednačini (4.5).

Veličine LE, P i F_o u gornjim jednačinama dobijaju se iz obrazaca

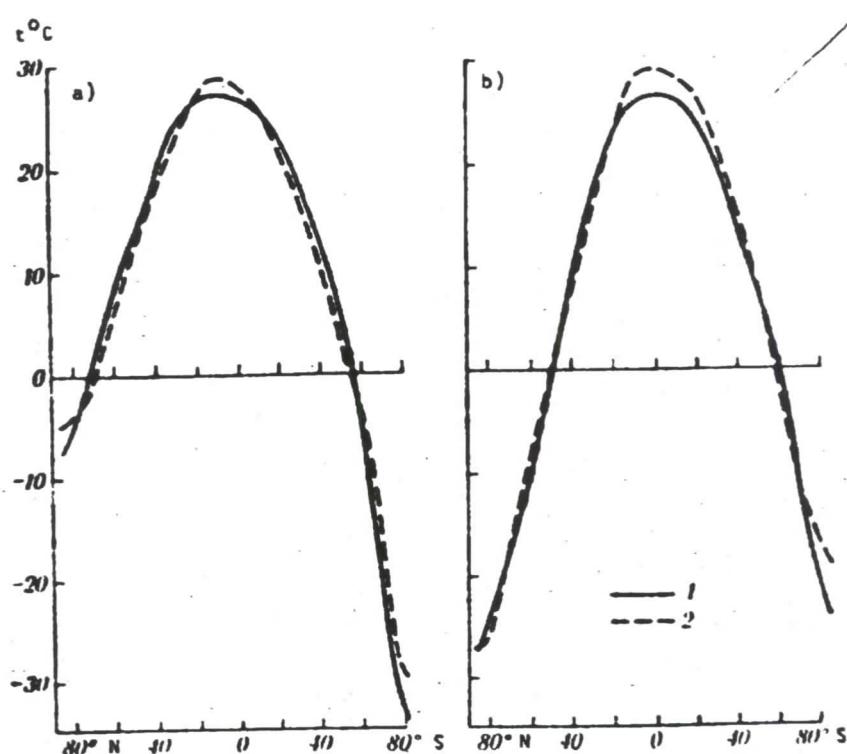
$$LE = f t_w$$

$$P = C(t_w - t)$$

$$F_o = \beta (t_H - t_p)$$

gde su f, C i β odgovarajući koeficijenit.

Kad se odgovarajući izrazi unesu u jednačine (4.3) i (4.2), a zatim iste reše po t_H i t_T dobiju se jednačine za izračunavanje srednjih širinskih temperatura za hladnu odnosno toplu polovinu godine. Tako dobijene srednje širinske temperature grafički su predstavljene na slici 27. Na istoj slici su takođe predstavljene drugom krivom osmotrene vrednosti temperature za sve geografske širine. Razlike između izmerenih i izračunatih temperatura po ovom modelu uglavnom ne prelaze vrednosti 1-2 °.



Slika 27

Raspodela srednjih širinskih temeperatura vazduha

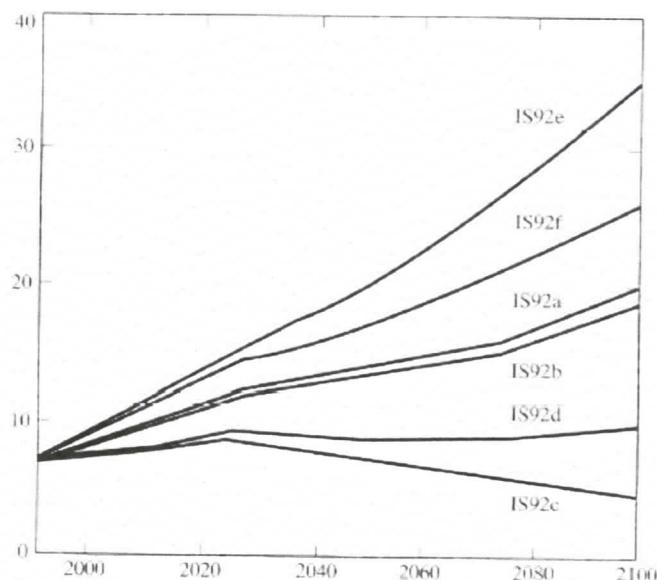
a) - leto na severnoj hemisferi;

b) - leto na južnoj hemisferi; 1- osmotrene vrednosti; 2- izračunate vrednosti (Budiko, 1974.)

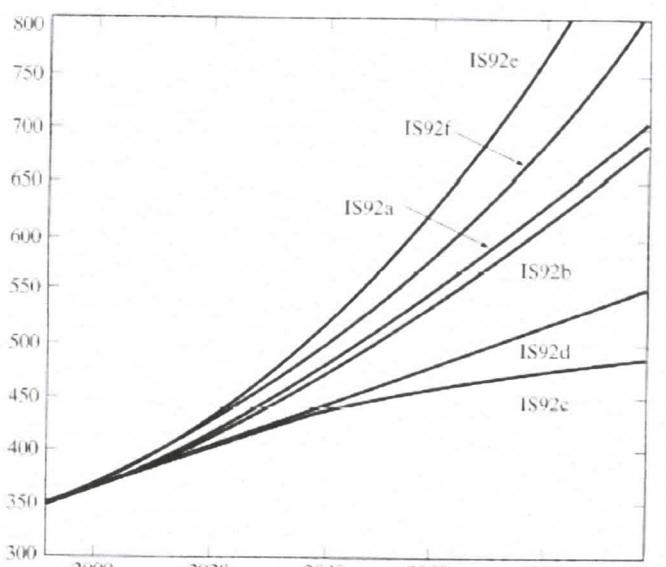
5. IPCC scenariji emisije

IPCC je izradio nekoliko scenarija emisije gasova staklene bašte i aerosola koji su postali standardna ulazna osnova svima koji se bave modeliranjem klime. To su scenariji, a ne procene ili predviđanja, čiji je cilj da obuhvate veliki broj mogućih situacija oko emisije u budućnosti. Zapravo, učinjen je pokušaj da se proceni verovatnoća bilo kog scenarija.

U IPPC izveštaju za 1992. godinu urađen je i predstavljen jedan set od šest scenarija. Njih zajednički nazivamo IS92, gde IS označava scenario IPCC, a 92 godinu izveštaja. Slika 28 prikazuje delove emisije ugljenika iz ovih scenarija i rezultujuće koncentracije CO₂. Kompletni scenariji uključuju i ostale gasove staklene bašte (CH₄, N₂O, halougljenici) kao i sumpor okside i NOx, VOC i CO prekursore troposferskog ozona. U kompletnim scenarijima su uključene širom sveta preuzete obaveze da se smanji upotreba supstanci koje uništavaju ozon. IS92a je jedan «srednji» scenario koji, na primer, koristi srednjoročne projekcije rasta stanovništva i privrednog razvoja. Scenariji IS92 koji su prikazani na slici 28 prikazuju ukupne svetske emisije samo jednog gasa, CO₂. Kompletni scenariji uključuju emisije svih gasova staklene bašte na regionalnoj i svetskoj osnovi. Slika 29 predstavlja regionalne stope emisije za dva najvažnija gase staklene bašte, CO₂ i CH₄, za godine 1990. i 2100, uz korišćenje srednjeg scenarija IS92a. Treba primetiti kako se s vremenom pomera distribucija emisije ugljenika. Godine 1990., 2,8 GtC koji su emitovale ekonomsko razvijene zemlje je predstavljalo skoro polovinu ukupne svetske emisije. U godini 2100. ova emisija porasla je na 4,3 GtC godišnje, ali do tog vremena je ostatak sveta toliko povećao svoju emisiju da ekonomsko razvijene zemlje predstavljaju samo 22 posto ukupne emisije. Po ovom scenariju stopa emisije ugljenika za Kinu i ostale centralnoazijske zemlje sa planskom privredom, rastu sa 0,6 GtC godišnje (1990. godina) na 4,2 GtC godišnje (2100. godina). Ovakvo pomeranje, uzrokovano prvenstveno porastom potražnje za energijom u zemljama u razvoju, je mnogo dramatičnije u pomeranju procenata za CH₄, što je prikazano na slici 29b.



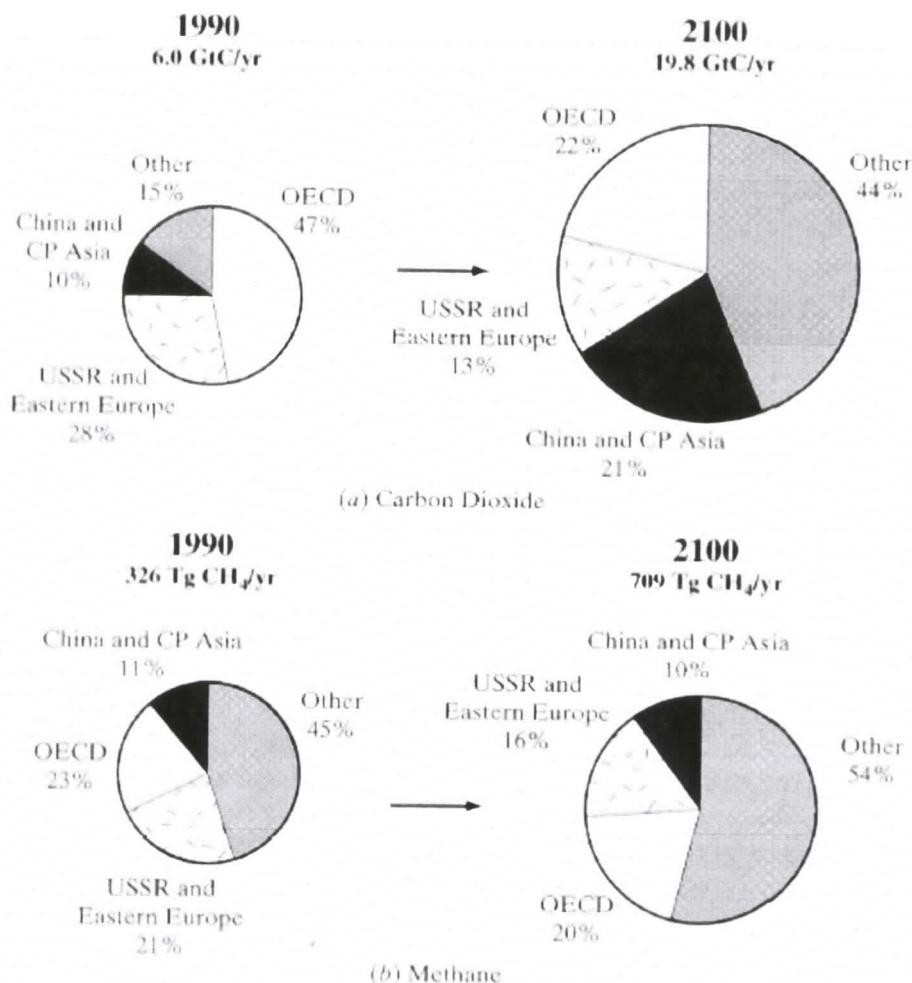
(a)



(b)

Slika 28

Šest IPCC 1992 scenarija za ugljenik. (a) godišnja emisija CO₂ (GtC) koja potiče od dobijanja energije, cementa i uništavanja tropskih šuma. (b) rezultujuća koncentracija CO₂(ppm). (Izvor: IPCC, 1996)



Slika 29

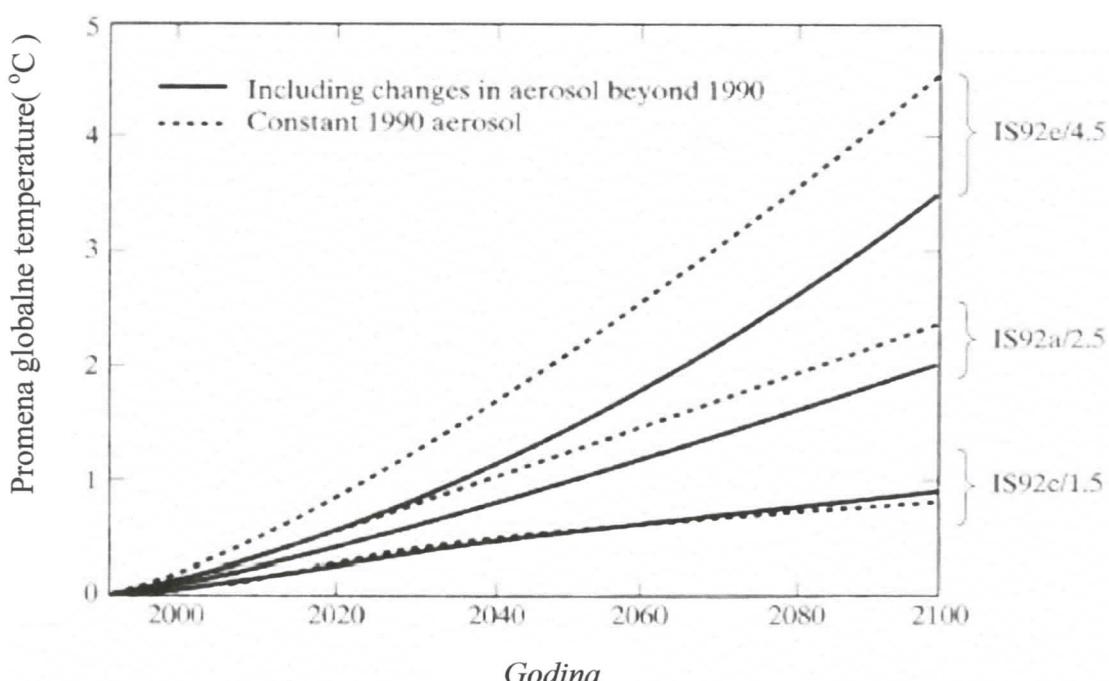
IS92a emisioni odnos za CO_2 i CH_4 u 1990 i 2100 god. Ova poređenja iz IPCC (1992) malo se razlikuju od skorašnjih IPCC izveštaja.

5.1. Predviđanja srednjih globalnih temperatura

Scenariji IS92 daju šest različitih procena emisija gasova staklene bašte tokom narednih 100 godina. Ovih šest scenarija se koriste kao ulaz za modele koji procenjuju buduće srednje globalne temperature. Ti temperaturni modeli obično kao jedan od parametara imaju klimatsku osetljivost, ΔT_{2x} , koja predstavlja promenu srednje globalne temperature koja proističe iz uđvostrućenih ekvivalentnih CO_2 koncentracija. Opšti cirkulacioni modeli imaju tendenciju da daju ΔT_{2x} polju između 1,5°C i 4,5°C. Sada je postala uobičajena praksa za modele srednje globalne temperature da koriste tri moguće vrednosti te klimatske osetljivosti:

1,5°C; 2,5°C i 4,5°C. Množenjem 6 scenarija sa 3 klimatske osetljivosti dobijamo 18 mogućih procena budućih srednjih globalnih temperatura. Dodatni ograničavajući faktor je neizvestan uticaj budućih koncentracija aerosola. Neki modeli se rade pod pretpostavkom da neće biti promena u koncentraciji aerosola, tj. da će negativno forsiranje uzrokovano aerosolima ostati konstantno od vremena 1990. Neki drugi modeli rade pod pretpostavkom da će aerosoli u budućnosti rasti. Šest scenarija IS 1992, sa tri moguće klimatske osetljivosti, i dve mogućnosti za aerosole, znači 36 različitih procena srednje globalne temperature u budućnosti.

Opseg rezultujućih srednjih globalnih temperatura po osnovu scenarija IS92 prikazan je na Slici 30. Do 2100. godine, taj opseg se kreće između 0,8°C i 4,5°C. Srednja procena, koja se podudara sa scenarijom IS92a sa konstantnim emisijama aerosola i klimatskom osetljivošću od 2,5°C, sugerira da bi temperatura zemlje oko 2100. godine mogla da bude negde oko 2,4°C toplija nego sada. To bi značilo da će planeta biti toplija nego što je ikada bila tokom stotina hiljada godina.



Slika 30

Opseg mogućih promena temperature na globalnom nivou. Gornja kriva je za IS92e pretpostavljajući konstantnu koncentraciju aerosola oko 90-tih, i veliku klimatsku osetljivost ($\Delta T_{2X}=4,5^{\circ}\text{C}$); niža kriva je za IS92c, takođe se pretpostavlja konstantna koncentracija aerosola, ali uz nižu klimatsku osetljivost ($\Delta T_{2X}=1,5^{\circ}\text{C}$). Srednji scenario je za IS92a koji dovodi do temperaturne promene od 2,0 do 2,4°C.

5. 2. Kjoto protokol

Šta učiniti da se globalno zagrevanje zaustavi pre nego što tropске šume prestanu da apsorbuju ugljen-dioksid? Odgovor je jednostavan: treba odmah zaustaviti emisiju antropogenog ugljen-dioksida u atmosferu, prekinuti seču tropskih šuma i ništa više od toga. Atmosfera će se sama brzo vratiti umerenijim temperaturama, ako se to uskoro učini. Nažalost, ove jednostavne zahteve vrlo je teško ostvariti, jer bi prelaz sa fosilnih goriva na čiste izvore energije za sobom kratkoročno nosio znatne gubitke u energetici i opadanje

ekonomskog rasta, što je teško prihvatljiva cena za zemlje zapada. Tokom dvadeset godina demonstracija, parlamentarne borbe, propagandnih kampanja, javnih upozorenja i poziva na obustavu ili smanjenje emisije ugljen-dioksida, ekološki aktivisti širom sveta učinili su samo malo više od ništa. Sadržaj ugljen-dioksida uporno raste, a ekonomski magnati, vlasnici energetskih kompanija i vlade zapadnih država ostali su ravnodušni prema svim molbama, zahtevima i vapajima za spas planete, skriveni iza tobožnjih socijalnih posledica (iako je nesumnjivo najveća socijalna posledica da ostanemo bez planete na kojoj bismo živeli). Do sada najozbiljniji pokušaj da se nešto učini desio se od 1. do 11. decembra 1997, kada su se u japanskom gradu Kjoto sastali lideri 160 nacija, kako bi se dogovorili o eventualnom smanjenju gasova staklene bašte u atmosferi. Tom prilikom, potpisani je Kjoto protokol, prema kome su se razvijene nacije (ujedno i najveći zagadivači vazduha) obavezale na ukupnu redukciju emisije gasa CO₂ za 5,2 % do 2012, relativno u odnosu na nivo emisije iz 1990. godine. Pritom, smanjenje emisije je raspodeljeno samo na 34 zemlje koje godišnje zajedno emituju 13,7 miliona tona ugljen-dioksida, ali u procentualnim iznosima koji odgovaraju njihovom ukupnom učeštu u toj količini. Evropska unija, prema protokolu iz Kjota, ima obavezu da smanji emisiju za 8 odsto, Sjedinjene države za 7 odsto, Japan za 6 odsto, a slede druge zemlje s manjim iznosima.

Uprkos nadi da bi ovaj plan mogao bar donekle zaustaviti pogubne posledice globalnog zagrevanja, optimizam je iščezao kada se ratifikacija sporazuma u najrazvijenijim zemljama poput SAD otegla neprijatno dugo, a njegova finalna primena naišla na realne i imaginarne prepreke. U međuvremenu, otpočela je gadna birokratska igra, u kojoj se procenti emitovanog ugljen-dioksida na čudan način odlivaju nerazvijenim zemljama – verovatno u obliku izmeštanja prljavih industrija, što omogućuje da se uz mali trošak dostignu zacrtani limiti emisije, preuzeti Protokolom iz Kjota, a da se u suštini ništa ne promeni. Ova strategija prebacivanja odgovornosti i trovanja atmosfere iz tuđeg dvorišta (u skorije vreme aktuelizovana i na Balkanu, što je tema za sebe) dovela je u sumnju realnu vrednost planiranih smanjenja emisije CO₂. Uostalom, nova klimatološka istraživanja pokazuju da je ta količina ionako nedovoljna za znatnije smanjenje globalnog zagrevanja, naročito ako i tropske šume povećaju svoju emisiju ugljen-dioksida. Danas, u 2007. godini, kada se klima već očigledno menja, gradovi i ostrva tonu pod vodom, a ostaci upropastištenih tropskih šuma čudljivo odbijaju saradnju, postaje prilično očigledno da se iza nedovoljne aktivnosti odgovornih u pogledu zaustavljanja efekta staklene bašte kriju neshvatljiva bahatost i neopravdiva pohlepa. Zato je efekat staklene bašte postao manje klimatski i ekološki problem, a više moralno pitanje. Ova istina izbija na površinu u svakoj od brojnih interpretacija globalnog zagrevanja, njegovih uzroka i posledica, jer kako god gledali na ovaj problem, interpretacija je samo jedna klima se ozbiljno i sve brže menja, a čovek je jedini krivac za taj zločin. Po svemu sudeći, čovek će snositi i njegove nimalo prijatne posledice.

Čak i nakon što se CO₂ stabilizuje na nekom konstantnom nivou, urođena inercija klimatskog sistema uslovljava da globalne temperature i dalje rastu u dugom nizu godina.

5.2.1. Kratkoročno i srednjoročno ublažavanje klimatskih promena(do 2030.)

Polazeći od odredbi člana 2. Okvirne konvencije UN o promeni klime, koje zahtevaju od država ugovornica preventivno sprečavanje opasnih promena klime i u tom cilju preduzimanje mera stabilizacije atmosferskih koncentracija gasova sa efektom staklene bašte na nivou koji bi omogućio dalji održivi ekonomski razvoj i prirodnu adaptaciju ekosistema na klimatske promene, u toku pripreme Četvrtog izveštaja IPCC sprovedena je detaljna analiza dosadašnjeg trenda globalnih antropogenih emisija gasova sa efektom staklene bašte, kao i projekcija trenda atmosferskih koncentracija gasova sa efektom staklene bašte do 2030. godine. Procenjuje se da će se sadašnji trend rasta atmosferskih koncentracija gasova sa efektom staklene bašte u iznosu od 1,4% godišnje nastaviti, i da se, s obzirom na kumulativno

dejstvo istorijskih i sadašnjih emisija zbog dugog zadržavanja tih gasova u atmosferi, bez radikalnog smanjenja globalnih antropogenih emisija ne može ostvariti navedeni osnovni cilj Konvencije. Prema mišljenju većine naučnika uključenih u rad ove Radne grupe IPCC-a, porast globalne temperature vazduha od 20°C u odnosu na predindustrijski nivo predstavlja graničnu vrednost, iznad koje bi nastale opasne klimatske promene sa nesagledivim irreverzibilnim procesima u klimatskom sistemu naše planete. Treba naglasiti da je u prethodnom Trećem sinteznom naučnom izveštaju iz 2001. godine svetska javnost upozorenata da će u slučaju stabilizacije koncentracije CO_2 na nivou od 450 ppm, porast globalne temperature vazduha u ovom veku biti u granicama od $1,5^{\circ}\text{C}$ do $3,9^{\circ}\text{C}$ u odnosu na prosek 1961-1990, dok bi porast temperature vazduha u slučaju stabilizacije koncentracije CO_2 na nivou od 1000 ppm, bio u opsegu od $3,5^{\circ}\text{C}$ do $8,7^{\circ}\text{C}$, što znatno prevazilazi gornju granicu porasta temperature iznad koje je zona opasnih poremećaja u klimatskom sistemu.

U toku 2004. godine zabeležene su najveće atmosferske koncentracije glavnih gasova sa efektom staklene bašte, koje su iznosile: 377,1 ppm za CO_2 ; 1783 ppb za CH_4 , i 318,6 ppb za N_2O , a koje su u odnosu na predindustrijski nivo veće za 35%, 155% i 18% respektivno. U odnosu na prethodnu deceniju, sadašnje atmosferske koncentracije ugljen-dioksida veće su čak za 19 ppm. Prema projekcijama rasta atmosferskih koncentracija CO_2 koje se navode u najnovijem nacrtu Izveštaja Radne grupe 3, IPCC, već oko 2030. godine vrednost koncentracija CO_2 dostigla bi 450 ppm. U Izveštaju se dalje naglašava neophodnost usvajanja znatno oštrijih mera redukcije emisija gasova sa efektom staklene bašte u daljim međunarodnim pregovorima koji se odvijaju u okviru Protokola iz Kjota i Okvirne konvencije UN o promeni klime. Takođe se naglašava da se problem klimatskih promena mora uključiti u nacionalne strategije i to iz dva ključna razloga: iz razloga što klimatske promene pojačavaju siromaštvo, i iz razloga što mere ublažavanja, tj. smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte redukuju ranjivost na klimatske promene.

U tabeli 6 prikazane su tehnologije ublažavanja emisije gasova staklene bašte.

Sektor	Ključne tehnologije ublažavanja i prakse koje su komercijalno na raspolaganju	Ključne tehnologije ublažavanja i prakse projektovane da budu komercijalne pre 2030
Snabdevanje energijom	Poboljšana efikasnost proizvodnje i distribucije; prelaz sa uglja na gas; nuklearna energija; obnovljiva toplota i energija (hidro, sunčeva, vетра, geotermalna i bioenergija); kombinovanje toplote i energije; rane primene CCS (skladištenje uklonjenog CO ₂ iz prirodnog gasa).	Ekstrakcija ugljenika i skladištenje (CCS) za gasna, biomasesna i ugljena postrojenja koja proizvode struju; unapređena nuklearna energija; unapređena obnovljiva energija, uključujući eneriju plime i talasa, korišćenje koncentrovane solarne energije
Transport	Vozila sa efikasnijim gorivom; hibridna vozila; vozila sa čistijim dizelom; biogoriva; prelaz sa drumskog na železnički i javni transport; nemotorizovani prevoz (bicikli, pešačenje); planiranje korišćenja zemljišta i transporta.	Bio-goriva druge generacije; efikasniji avioni; poboljšana električna i hibridna vozila sa jačim i pouzdanim baterijama.
Gradjevinarstvo	Efikasna rasveta i dnevno svetlo; efikasni električni aparati i uređaji za grejanje i hlađenje; poboljšani šporeti, poboljšana izolacija; projektovanje pasivnog i aktivnog korišćenja sunca za grejanje i hlađenje; alternativni rashladni fluidi; obnavljanje i reciklaža fluornih gasova.	Integrисано projektovanje komercijalnih zgrada, uključujući tehnologije inteligentnih merača koji obezbeđuju povratnu vezu i kontrolu; solarna energija integrisana u gradjevinarstvo.
Industrija	Efikasnije krajnje korišćenje električne opreme; obnavljanje toplote i energije; reciklaža i zamena materijala; kontrola emisija gasova koji nisu CO ₂ ; široka lepeza tehnologija specifičnog procesa.	Poboljšana efikasnost energije; CCS za proizvodnju cementa, amonijaka i gvožđa; inertne elektrode za proizvodnju aluminijuma.
Poljoprivreda	Poboljšano upravljanje zemljom i pašnjacima radi povećanja depozita ugljenika u zemljištu; obnavljanje obradivog tresetnog zemljišta i degradiranog zemljišta; Poboljšani postupci gajenja pirinča i stoke i upravljanje đubrenjem radi smanjenja emisija CH ₄ ; poboljšane tehnike primene azotnog đubriva za smanjenje N ₂ O emisija; namenski energetski usevi radi zamene fosilnog goriva; poboljšana efikasnost energije.	Poboljšanje prinosa useva.
Šumarstvo /šume	Pošumljavanje; obnavljanje šuma; upravljanje šumama; smanjeno krčenje šuma; gazdovanje eksploatacijom drvenih proizvoda; korišćenje šumskih produkata za bioenergiju radi zamene korišćenja fosilnih goriva.	Poboljšanje vrsta drveća radi povećanja produktivnosti biomase i sekvestracije (odvajanje) ugljenika; poboljšane tehnologije daljinskog merenja za analizu vegetacije/potencijala sekvestracije ugljenika i pravljenje mapa o promeni korišćenja zemljišta.
Otpad	Rekuperacija ⁴ zemnog metana; spaljivanje otpada uz energetski oporavak; mešanje organskog otpada; kontrolisana obrada otpadnih voda; reciklaža i minimiziranje otpada	Bio-poklopci i bio-filteri radi optimizacije CH ₄ oksidacije.

Tabela 6

Ključne tehnologije ublažavanja i prakse po sektorima. Sektori i tehnologije navedeni su bez naročitog reda. Ne-tehnološke prakse, kao što su promene načina života, koje su zajedničke među sektorima, ne nalaze se na ovoj tabeli.

⁴ Iskorišćavanje gasova koji se stvaraju pri koksovanju uglja; ponovno dobijanje materija koje se troše pri raznim tehnološkim procesima.

5.3. MAGICC/SCENGEN

MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change) Model za procenu klimatskih promena izazvanih efektom "staklene bašte" je skup modela kruženja gasova, klimatskih modela i modela topljenja polova koji korisniku omogućava da odredi globalnu srednju temperaturu i njen uticaj na nivo mora i okeana, na osnovu emisivnosti gasova koji izazivaju efekat "staklene bašte" i emisivnosti sumpor dioksida. MAGICC je osmišljen da se koristi u dve glavne svrhe:

- da uporedi emisije po "Policy" scenariju sa emisijama po "Reference" scenariju da bi se videlo koliko je odstupanje od kontrolnih vrednosti predviđenih po "Policy" scenariju.
- da prikaže kolike su promene rezultata ako se promeni neki od parametara modela.

MAGICC je klimatski model koji se koristio u svim IPCC ocenama projekcija srednje globalne temperature. Da bi se MAGICC pokrenuo prvo se moraju odabrati dva emisiona profila (scenarija).

Oni su nazvani Reference Scenario i Policy Scenario (Predviđena emisija gasova "staklene bašte" po Kjoto protokolu predstavljena je u programu MAGICC kao Policy Scenario) i njihovi standardi su Reference = IS92a i Policy= IS92d.

SCENGEN (Scenario Generator Spatial Climate Change), scenario generator prostorno klimatskih promena, koristi metod preračunavanja iz Santer et al. (1990) da napravi prostorni obrazac promena iz velike baze podataka atmosfersko/okeanskih opštih cirkulacionih modela(Atmosphere Ocean General Ceirculation Model (AOGCM)). Metod preračunavanja se bazira na razdvajajanju globalnih i prostornih komponenti budućih klimatskih promena i uključuje uticaj gasova staklene bašte i aerosolnih komponenti. Prostorni obrasci u bazi podataka su "normalizovani" i izraženi kao 1°C promene u globalnoj temperaturi. Ovi normalizovani gasovi uzročnici staklene bašte i aerosolne komponente su obeleženi, sabrani i skalirani prema globalnim temperaturama definisanim od strane MAGICC-a za datu godinu, scenario emisije i set parametara klimatskog modela. Za SCENGEN skalirane komponente korisnik može da izabere iz mnoštva različitih AOGCM-a za sve setove gasova uzročnika staklene bašte. Što se tiče aerosolnih komponenti trenutno postoji samo set rezultata jednog modela (Michael Schlesinger).

U ranijim verzijama MAGICC/SCENGEN-a (Version 2.4, May 2000; Hulme et al., 2000), MAGICC komponenta koristi IPCC-ov Drugi sintezni izveštaj (Second Assessment Report (SAR)). SCENGEN komponenta dozvoljava korisniku da razmatra samo promene srednjeg klimatskog stanja kao reakcija na spoljne sile. Sadašnja verzija koja pravi napredak u ovim oblastima menja MAGICC do nivoa koji je dat u IPCC Trećem sinteznom izveštaju (Third Assessment Report (TAR)), i dodaje nove mogućnosti SCENGEN-u. Unapredjenja SCENGEN-a dozvoljavaju korisniku da poredi AOGCM-e u SCENGEN bazi podataka sa posmatranim klimatskim podacima; kvantifikuje i istraži varijabilnosti;

- bolje kvantifikuje nesigurnosti u pogledu odnosa signal-šum;
- proizvede skalu verovatnoće izlaznih podataka zasnovanu na međumodelnim razlikama;
- i proizvede prosečne izlazne podatke usrednjeni po površini za odabrane regije

5.3.1. Uvod

Nova verzija MAGICC/SCENGEN je dizajnirana da obavlja sledeće zadatke:

- da ažurira MAGICC do verzije korišćene u IPCC TAR
- da zadrži SRES (emisioni scenario Drugog izveštaja) emisione scenarije sa prisutnim povećanjem opsega gasova tako da bi buduće emisije bile bolje određene u MAGICC-ovim bazama podataka emisija, i da doda nove emisione scenarije za stabilizaciju koncentracije CO₂ dozvoljavajući da se efekat povratne sprege primeni na ugljenični ciklus
- da unapredi SCENGEN-ovu osnovnu posmatračku klimatsku bazu podataka da bi dao punu globalnu pokrivenost a ne kao u verziji 2.4 samo kopnenu pokrivenost
- da uključi nove i ažurnije rezultate klimatskih modela u SCENGEN-ovu bazu podataka
- da dozvoli korisniku da istraži promene u varijabilnosti
- da kvantificuje nejasnoće u odnosu na među-modelne razlike, i da ih koristi da prikaže verovatnije izlazne podatke
- da kvantificuje nejasnoće u vremenskom domenu preko standardnih signal-zvuk odnosa, gde je signal promena u srednjem stanju a zvuk je osnova međugodišnjih primenljivosti
- da obezbedi rezultate usrednjenje po površini za unete regije od strane korisnika odabranih iz biblioteke standardnih regija

Novi SCENGEN kod proizvodi širok spektar vrednosti kako geografske širine tako i dužine i tabelarnih izlaznih podataka. Najvažnije vrednosti izlaza mogu se videti kao globalne mape na SCENGEN-ovom 5° sa 5° mreži.

Veća rezolucija, ograničena površina mape u prethodnim SCENGEN programima više se ne koriste. Ovo je delom rezultat korišćenja nove globalne klimatologije. U idealnim uslovima, SCENGEN bi trebao da ima globalnu, visokorezolucijsku klimatologiju na raspolaganju korisniku (1° sa 1° ili 0,5° sa 0,5°), ali da bi se napravili i implementirali takvi setovi podataka potrebno je puno vremenja. i pre, prvi korak je da se pokrene MAGICC. Korisnik počinje rad selektujući par emisionih scenarija, označenih kao Referentni scenario (R) i Policy scenario (P). Biblioteke emisija iz kojih su napravljene ove selekcije sada uključuju i SRES scenarije. Ovi imaju mnogo širi opseg gasova za koje su emisije određene. Zbog ovoga, emisioni scenariji se mogu menjati i ili dodavati koristeći bilo koji softver za menjanje koji korisnik izabere. Korisnik tada selektuje set gasnih ciklusa i parametar klimatskog modela.

5.3.2. CO₂ stabilizacija

Veoma važna nova osobina u MAGICC-u je uključenje uticaja klimatskih povratnih sprega na ugljenični ciklus, prateći TAR. Ovo komplikuje pitanje determinisanja potrebnih emisija za stabilizaciju CO₂ koncentracije. (Ova povratna sprega može biti uključena ili isključena u MAGICC-u, a po default-u je uključena.)

Standardni put koncentracije CO₂ do stabilizacije je WRE put koji stabiši na 350, 450, 550, 650 i 750 ppm (Wigley et al., 1996). Emisione potrebe za praćenje tih puteva su u početku izračunate koristeći iste modele ugljeničnih ciklusa kao što je upotrebljeno u MAGICC-u, ali zanemarujući moguće uticaje klimatskih povratnih sprega na ugljenični ciklus i pokrećući model sa podacima samo iz 1990. Sadašnja verzija modela uključuje i klimatsku povratnu spregu ugljeničnog ciklusa i uključuje podatke iz 2000. Ali, i sa istim profilima koncentracije, emisije potrebne za praćenje

ovih procesa će biti različite.

MAGICC koristi emisione scenarije kao primarne početne podatke. Ali, da bi se uzela u obzir i stabilizacija neophodno je definisati emisione scenarije koji proizvode koncentracije prateći izabrani profil. U originalnom WRE radu, ovo je bilo jednostavno pošto je klimatska povratna sprega ignorisana.

Sa uključenom povratnom spregom, naime, emisije zavise od projekcije budućeg zagrevanja (koje definiše koliko promene koncentracije CO₂ utiču na povratnu spregu). Sa druge strane ovo zavisi od faktora koji određuju ovo zagrevanje, a najviše od gasova i od prepostavljene klimatske osjetljivosti. Ovo dalje znači da ne postoji jedinstven set emisija CO₂ za bilo koji dat profil uračunate emisije će zavisiti od prepostavljenih ne-CO₂ emisija i prepostavljenih parametara klimatskih modela.

Od parametara klimatskog modela, najznačajnija je klimatska osjetljivost, za koju je osnovna vrednost $\Delta T_{2X} = 2,6^{\circ}\text{C}$. Dodatno, MAGICC uključuje i oksidaciju fosilno izvedenog CH₄ kao i *in situ* CO₂ izvora.

Trebalo bi znati da postoje velike nesigurnosti u veličini uticaja ovih klimatskih povratnih sprega za ugljenični ciklus. Samo je jedan slučaj ovde razmatran, i ovi rezultati su svojstveni MAGICC ugljenikovom cikličnom modelu. Za šest SRES scenarija, MAGICC daje projekcije koncentracije koje su veoma slične sa druga dva ugljenično ciklična modela koji su korišćeni u IPCC TAR (ISAM i BERN modelima) pogledati tabelu ispod.

	A1B	A1T	A1FI	A2	B1	B2
ISAM	717	582	970	856	549	621
Bern	703	575	958	836	540	611
MAGICC	707	566	967	850	536	612

CO₂ koncentracije počevši od 2100. godine za SRES scenarije (ppm). ISAM i BERN rezultati su 'referentne' vrednosti. MAGICC rezultati koriste (u ovim objašnjenim slučajevima) klimatsku osjetljivost od $\Delta T_{2X} = 2,5^{\circ}\text{C}$ (MAGICC osnovna osjetljivost je $\Delta T_{2X} = 2,6^{\circ}\text{C}$), osnovne vrednosti za sve ostale parametre modela, i originalne troposferske ozonske parametre. MAGICC po standardu koristi postojeće ozonske parametre (videti Wigley et al., 2002).

Međutim, ove sličnosti su delimično rezultat kompenzacionih razlika. MAGICC ugljenični ciklus model daje za nijansu više koncentracije od druga dva modela kada se klimatske povratne sprege ne koriste. Razlike su većinom kompenzovane nižom vrednošću za povećanje koncentracije nastajući iz klimatskih povratnih sprega. Sadašnja verzija MAGICC ugljeničnog ciklusa ima manje efekte klimatske povratne sprega od većine ostalih modela.

Promene nivoa mora za stabilizacione scenarije

Doprinos povećanju nivoa mora usled topljenja glečera i malih ledenih kapa (Glaciers and Small Ice Caps) (GSIC), TAR uključuje i ispravku promena u oblasti GSIC. Promena je empirijski izведен kvadratni odnos

$$g_s(t) = a * g_u(t) - b * g_u(t) * g_u(t)$$

gde je g_u(t) neispravljeni član topljenja, funkcija faktora balansa osjetljivosti globalne mase i kumulativne promene u globalnoj temperaturi(TCUM), g_s(t) je prepravljeni član topljenja, i vreme 't' se meri od otprilike 1880. (U TAR, g_s(t) doprinos do 1990 je otprilike 1,9 cm.)

Ovaj kvadratni odnos uslovljava gornju granicu za $g_s(t)$ od 18,7cm, koja se javlja kada je $g_u(t)$ jednako 40,1cm. Kada TCUM prođe tačku na kojoj $g_s(t)$ dostiže svoj maksimum, iako $g_u(t)$ nastavlja da raste, $g_s(t)$ se smanjuje – što je fizički nemoguć rezultat. Ovaj 'nefizički' rezultat se nikad ne događa u slučajevima razmatranim u TAR, koji su ograničeni na promene samo do 2100. Ali ovo može i dešava se u stabilizacionim slučajevima gde se simulacije pokreću preko 2100. Da bismo ovo rešili, MAGICC drži $g_s(t)$ konstantnom na njenoj maksimalnoj vrednosti.

5.3.3 Nove SCENGEN karakteristike

Nove osmotrene baze podataka

Jedan od nedostataka ranijeg SCENGEN-a je da osnova prikazane klimatologije pokriva samo površinu kopna. Ovo znači da se buduća klimatska stanja mogu prikazati samo za kopno. Klimatologija padavina je usrednjena u periodu 1981-2000. godine dok je temperaturna klimatologija od 1961-1990. Zbog konzistencije bila bi poželjna 1981-2000. klimatologija temperatura (ili 1961-1990. padavina). Klimatologija padavina je nemoguća zbog nedostatka satelitskih podataka o padavinama pre 1979. Formiranje klimatologije temperature za interval 1981-2000. nije trivijalno pošto zahteva popunjavanje praznina u statistici.

Novi klimatski model podataka

U novom SCENGEN-u svi modeli podataka su iz Projekta klimatskog modela Inter-komparacije(Climate Model Intercomparison Project pogledati Covey et al., 2003). Uključeni su podaci iz 17 modela.

Naočigledniji metod, koji podrazumeva da ne postoji odstupanje, je da se oduzme stanje klime u nekom vremenu u budućnosti nastalo spoljašnji izazvanom smetnjom od početnog stanja, u istom eksperimentu. Ovo se naziva "Definicija 1". Drugi metod "Definicija 2" prepostavlja da je bilo koje odstupanje zajedničko i za kontrolni i za menjani eksperiment. Signal klimatske promene je onda dobijen oduzimanjem od menjanog klimatskog stanja u budućnosti paralelnog kontrolnog stanja u istom budućem vremenu (tj., kontrolni niz počinje sa istim ili približnim početnim uslovima kao i menjani niz). Osnovna pretpostavka ovde je da odstupanje nije značajno uslovljeno od strane bilo kojih spoljašnjih promena i pokazuje isti karakter u kontrolnom i menjanim eksperimentu.

U novom SCENGEN-u, korisniku je dat izbor da koristi podatke "Definicije 1" ili "Definicije 2" ili obe. Drugim rečima, ako imamo 17 modela u bazi podataka, u stvari imamo 34 niza podataka klimatskih promena.

I u "Definiciji 1" i "finiciji 2" podaci se odabiraju, zatim SCENGEN izračunava dve statistike da bi okarakterisao odstupanje: obrazac korelacije između dva polja svakog modela (za bilo koji region koje je korisnik odabrao); i prosečan model normalizovanog odstupanja polja (tj., odstupanje po 1°C globalnog zagrevanja), koje pojednostavljuje razliku "Definicija 2" minus "Definicija 1". Ako odstupanje ne bi bilo problem, ovi usaglašeni obrasci korelacije bi bili veliki (razlikujući se samo po varjabilnosti uzorka i modela) i polje odstupanja bi svuda bilo približno nula. Nažlost, i za modele koji se smatraju za "najbolje", ovi obrasci usklađenosti korelacije su obično mnogo manji od jedan, a polje odstupanja se značajno razlikuju od nule. Odstupanje je očigledno problem koji će pažnju prikazati u budućnosti. Korisniku se skreće pažnja da koristi podatke "Definicije 2".

Mogućnost provere tačnosti modela

Nova karakteristika SCENGEN-a je da sada može da izvede potvrde modela, poredeći nizove podataka osnovnog modela sa novim osmatranjima klime. U princi-

pu, korisnik može da iskoristi ove rezultate provera i da odabere koji model će da koristi. Treba napomenuti dve stvari: prvo, ako provera obuhvata ograničenu površinu, onda se dobri rezultati mogu dobiti pukim slučajem. Korisnik treba uvek da gleda statistiku globalnih provera kad pravi zaključke o individualnim modelima; drugo, dobra ili loša simulacija sadašnje klime ne mora obavezno da znači da će klimatska predviđanja biti dobra ili loša.

Potvrda rezultata u SCENGEN-u je data na dva načina: preko različitih sveobuhvatnih statističkih poređenja i kroz globalne mape polja grešaka. Za temperaturu, pola grešaka su definisana kao razlike. Ove razlike nisu ispravljene za površinske razlike u nadmorskoj visini između modela i stvarnih orografija, pa neke očigledno velike greške (e.g. preko Antartika) ne mogu reflektovati klimatske greške modela. Za padavine, polja grešaka su data kao odnos (tj., greška podeljena sa osnovnom vrednošću, prikazana u procentima).

Ne samo da SCENGEN razmatra individualne modele, nego takođe razmatra i prosek svih selektovanih modela. Kada se koriste svih 17 modela, ovaj ‘presečni model’ skoro uvek radi bolje od bilo kog individualnog modela u ispitivanju, delom opravdavajući korišćenje prosečnog modela pri kreiranju klimatskih scenarija.

Obrasci skaliranja

Sve prethodne primene metode skaliranja su koristile jednostavno linearno skaliranje. Drugim rečima, ako su normalizovane promene za datu posmatranu tačku ΔX , onda bi promena od 2°C globalnog zagrevanja bila $2\Delta X$. Ovo bi u principu moglo da dovede do nefizičkih rezultata.

Za temperaturu, na većoj geografskoj širini, zimsko zagrevanje bi stalno bilo veće od letnjeg zagrevanja. Za dovoljno veliko globalno zagrevanje, linearno skaliranje bi vodilo da zime budu toplige nego leta. U praksi (u opsegu mogućih globalnih zagrevanja) se ovo nikad ne dešava.

Za padavine i promene varijabilnosti, problemi mogu još lakše da se pojave. Kako su promene u oba slučaja iskazane u procentima, smanjenje normalizacije od $Y\%$ po 1°C globalnog zagrevanja može dovesti do negativnih padavina ili da rezultati globalnog zagrevanja premašuju $(100/Y)^{\circ}\text{C}$.

Da bi izbegli takvu mogućnost, novi SCENGEN daje dva alternativna (korisnički-odabrana) metoda skaliranja, standardni linearni i novi eksponencijalni metod skaliranja. Ako je ‘ a ’ procenat normalizovane promene u posmatranoj tački onda je skalirani procenat promene za globalno zagrevanje ‘ D ’ sledeći $A = 100[(1 + a/100)^D - 1]$ (što se smanjuje do linearne skaliranje za male vrednosti ‘ D ’). Ovom metodom, za negativne ‘ a ’, selektovane promene skaliranja nikad nisu negativne za bilo koje vrednosti ‘ D ’.

Za globalno zagrevanje manje od nekoliko stepeni celzijusovih, linearni i eksponencijalni metodi skaliranja daju veoma slične rezultate. Interesantno zapažanje je da eksponencijalno skaliranje ne očuvava rigorozno obrazce padavina – iako ovo nije obavezno netačan rezultat. Ipak, neke sinteze linearne i eksponencijalne skaliranja, ili nekih drugih metoda nelinearnog skaliranja mogu biti bolje. Dok eksponencijalno skaliranje ima prednost da izbegava nemoguće ishode, kao negativne padavine ili varijabilnosti, može da dovede do nerealno velikih promena ako je ‘ a ’ veliko. Na primer, ako je $a = 50\%$, onda bi linearno skaliranje dalo $A = 200\%$ za globalno zagrevanje od 4°C , dok će eksponencijalno skaliranje dati $A = 400\%$. Odabir između dva metoda skaliranja zahteva dalju analizu AOGCM rezultata.

6. Uticaj stabilizacije koncentracije CO₂ na buduće koncentracije CO₂, CH₄, N₂O, promenu srednje temperature i nivoa mora

6. 1. Parametri modela

U glavi 5. smo pomenuli da nova verzija MAGICC-a uključuje uticaj klimatskih povratnih sprega na ugljenični ciklus, prateći TAR.

Cilj ovog rada je bio da odredimo klimatske posledice stabilizacije svih emisija gasova staklene bašte i SO₂ na nivou od 450 ppm i 750 ppm. Ovo je veoma zanimljiv slučaj obzirom da pokazuje koliko je trenutno energije "zaključano" u sistemu i pokazuje da stabilizacija emisija ne vodi nužno do stabilizacije atmosferskog sastava klime. Pored ovoga želimo da ispitamo značaj uključenja povratnih sprega.

6.1.1 Model ugljenikovog ciklusa

Uključivanje ovog modela omogućava korisniku da ispita nesigurnosti u modelu ugljenikovog ciklusa menjajući srednju vrednost iz 1980. godine ukupne promene emisija CO₂ usled korišćenja zemljišta (D_n80s).

Osnovna vrednost za ovu promenljivu je 1,1GtC godišnje, što je i najbolja procena IPCC SAR. Postoji značajna nesigurnost pravih vrednosti ovih promena emisija CO₂. IPCC SAR opseg nesigurnosti je od 0,4 do 1,8 GtC godišnje. Korišćenje nižih vrednosti vodi do većih koncentracija i obrnuto. MAGICC pokreće modelu ugljenikovog ciklusa tri puta, svaki put sa različitom D_n80s vrednošću: 1,8; 1,1 i 0,4. Ova podešavanja, i dodatni CO₂ faktor fertilizacije, određuju visoki i niski kraj opsega za MAGICC prikaz koncentracije CO₂. Treba napomenuti da IPCC TAR, sugeriše malo drugačije vrednosti za gore navedene parametre. Kada je klimatska povratna sprega uključena u MAGICC model ugljenikovog ciklusa, koncentracije CO₂ se slažu sa IPCC TAR vrednostima .

6.1.2 C-ciklus klimatske povratne sprege

Važna promena od SAR do TAR je uključivanje kvantifikacije efekata klimatske povratne sprege u ugljenikov ciklus. Zbirni efekat je pozitivna povratna sprega, tako da njeno uključivanje dovodi do veće koncentracije koja se u suprotnom ne bi dobila. Postoji značajna nesigurnost u vrednostima ovih povratnih sprega, i svaki od ova tri modela ugljeničnih ciklusa korišćenih u IPCC TAR [Joos et al. (BERN), Jain et al. (ISAM) MAGICC modelima] imaju drugačije vrednosti. MAGICC koristi vrednosti povratnih sprega koje daju zbirnu klimatsku povratnu spregu koja je neznatno niža od vrednosti druga dva modela. Ove povratne sprege se mogu uključiti ili isključiti (po default-u je uključeno) tako da bi korisnik mogao da prosudi značaj MAGICC klimatskih povratnih sprega.

6.1.3. Forsiranje aerosolima

Postoje četiri komponente aerosolnih uzročnika efekta staklene bašte koji se koriste u MAGICC-u. Kod sve četiri komponente su moguće velike nesigurnosti. Početne vrednosti u MAGICC-u su one koje se koriste u IPCC TAR, ali korisnik kao alternative može da selektuje visoke ili male vrednosti aerosolnih uzročnika efekta staklene bašte.

6. Uticaj stabilizacije koncentracije CO₂ na buduće koncentracije CO₂, CH₄, N₂O, promenu srednje temperature i nivoa mora

Odvojene komponente aerosolnih uzročnika efekta staklene bašte se ne mogu menjati od strane korisnika. Srednji totalni efekat 1990 je $-1,3 \text{ Wm}^{-2}$. Niske i visoke vrednosti su $-0,8 \text{ Wm}^{-2}$ i $-1,8 \text{ Wm}^{-2}$.

6.1.4. Klimatska osetljivost

Klimatska osetljivost definiše ravnotežni odgovor globalne temperature vazduha dupliranju koncentracije CO₂. IPCC SAR najbolja procena ovog parametra je $2,5^\circ\text{C}$, sa opsegom od $1,5^\circ$ do $4,5^\circ\text{C}$. Za TAR projekcije korišćena je srednja vrednost od $2,6^\circ\text{C}$ (sredina za sedam AOGCM-ova čiji rezultati su korišćeni za kalibriranje MAGICC-a – pogledati dole). U osnovnom modu MAGICC pokreće svaki emisioni scenario tri puta kroz klimatski model, svaki put sa drugačijom vrednošću klimatske osetljivosti: $1,5^\circ$, $2,6^\circ$ i $4,5^\circ\text{C}$. Ova tri pokretanja definišu donji i gornji kraj opsega projekcija globalne temperature (približno 90% intervala poverenja) koji su prikazani na temperaturnom grafiku.

6.1.5. Model

U TAR-u globalna temperatura i nesigurnosti rasta nivoa mora su određene simulacijom rezultata sedam AOGCM-ova. MAGICC je prvi kalibriran da odgovara temperaturi za ovih sedam modela forsiranih sa $1\%/\text{god.}$ promena jedinjenja CO₂. MAGICC se onda pokreće za svaki od sedam setova parametara za pun opseg SRES emisionih scenarija. "Model" dugme dozvoljava korisniku da simulira globalnu temperaturu i promene rasta nivoa mora za bilo koji od sedam modela korišćenih u TAR: GFDL, CSIRO, HadCM3, HadCM2, ECH-OPZC, PCM ili CSM.

6. 2. Analiza klimatskih posledica usled određenih promena parametara modela

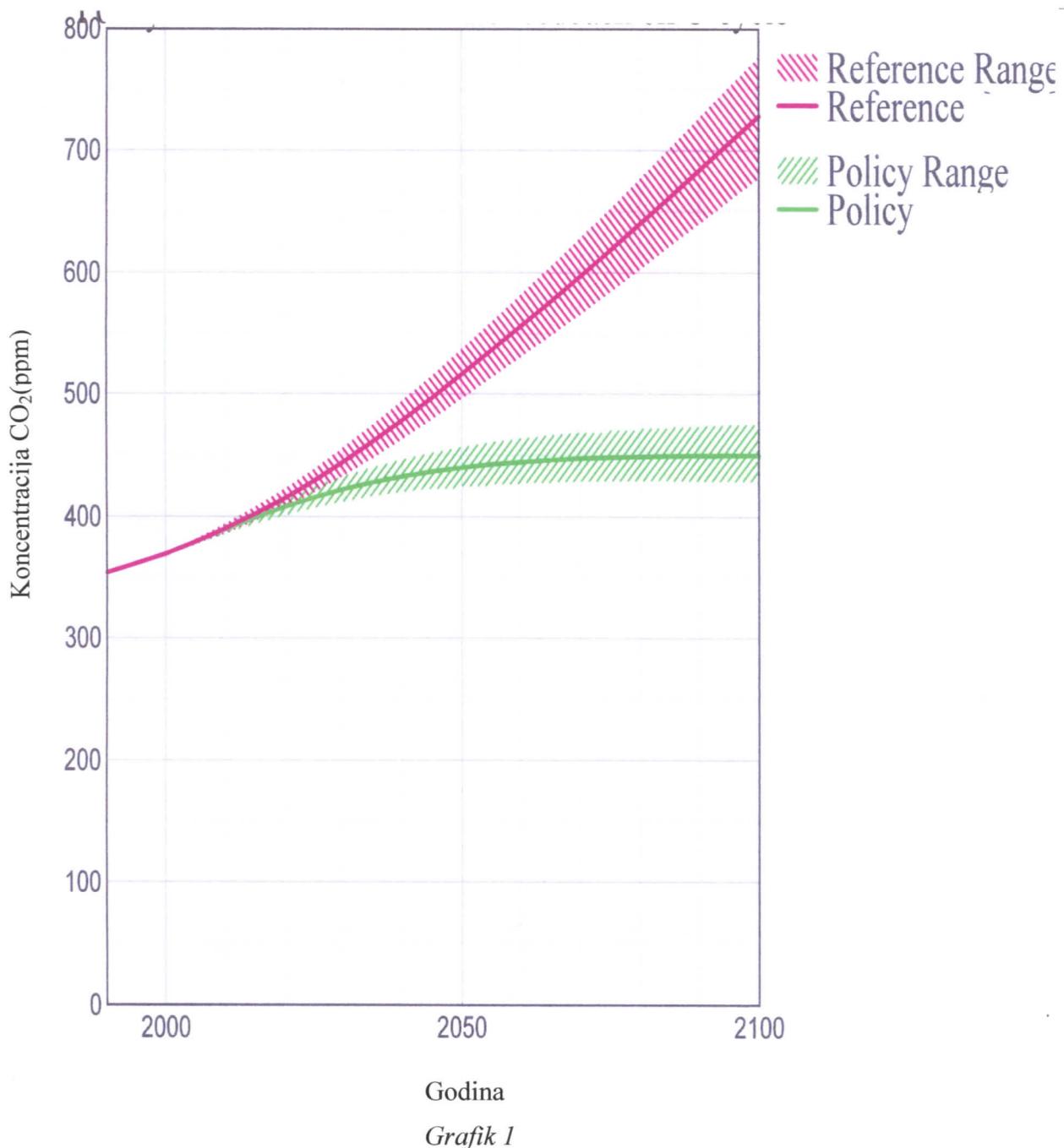
Korišćeni parametri modela su: $\Delta T_{2X} = 2,6^\circ\text{C}$ i CO₂ koncentracije od 450 ppm i od 750 ppm. SO₂ uzima vrednost od $-0,8 \text{ Wm}^{-2}$.

6.2.1 Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa uključenom povratnom spregom WRE450

Koncentracija CO₂(ppm)

Reference: SRES P50

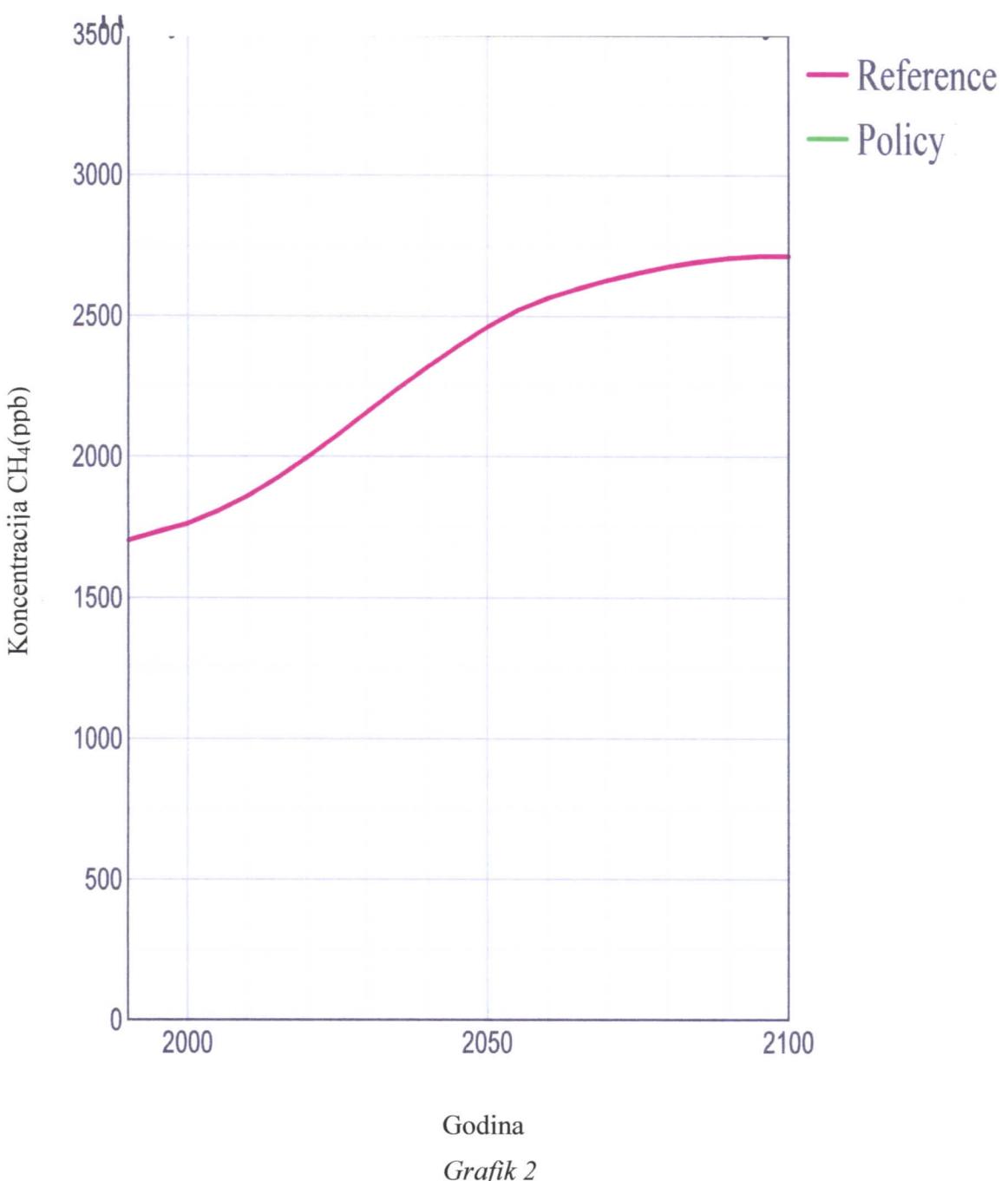
Policy: WRE450: scenario sa uključenom povratnom spregom



Koncentracija CH₄(ppb)

Reference: SRES P50

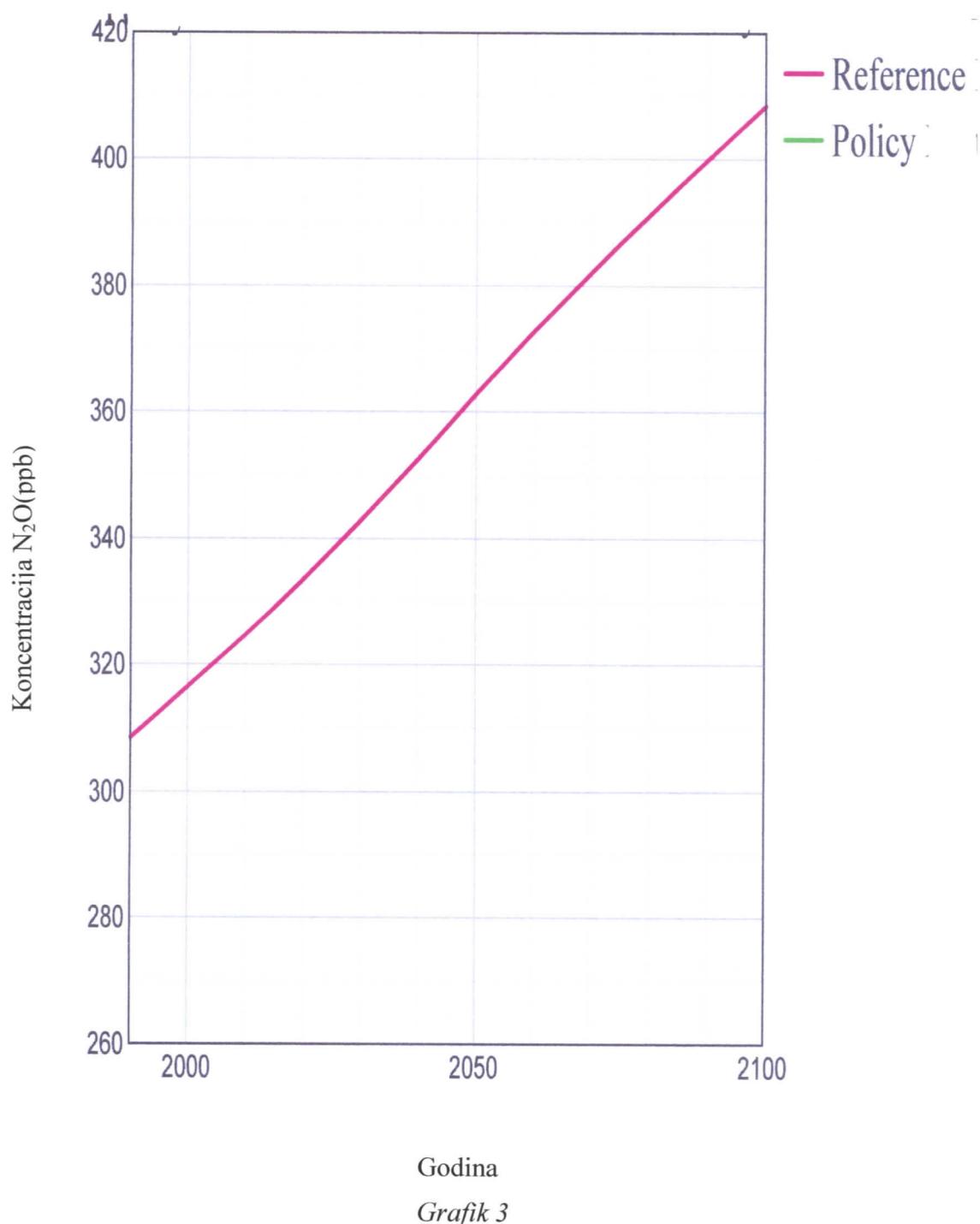
Policy: WRE450: scenario sa uključenom povratnom spregom



Koncentracija N₂O(ppb)

Reference: SRES P50

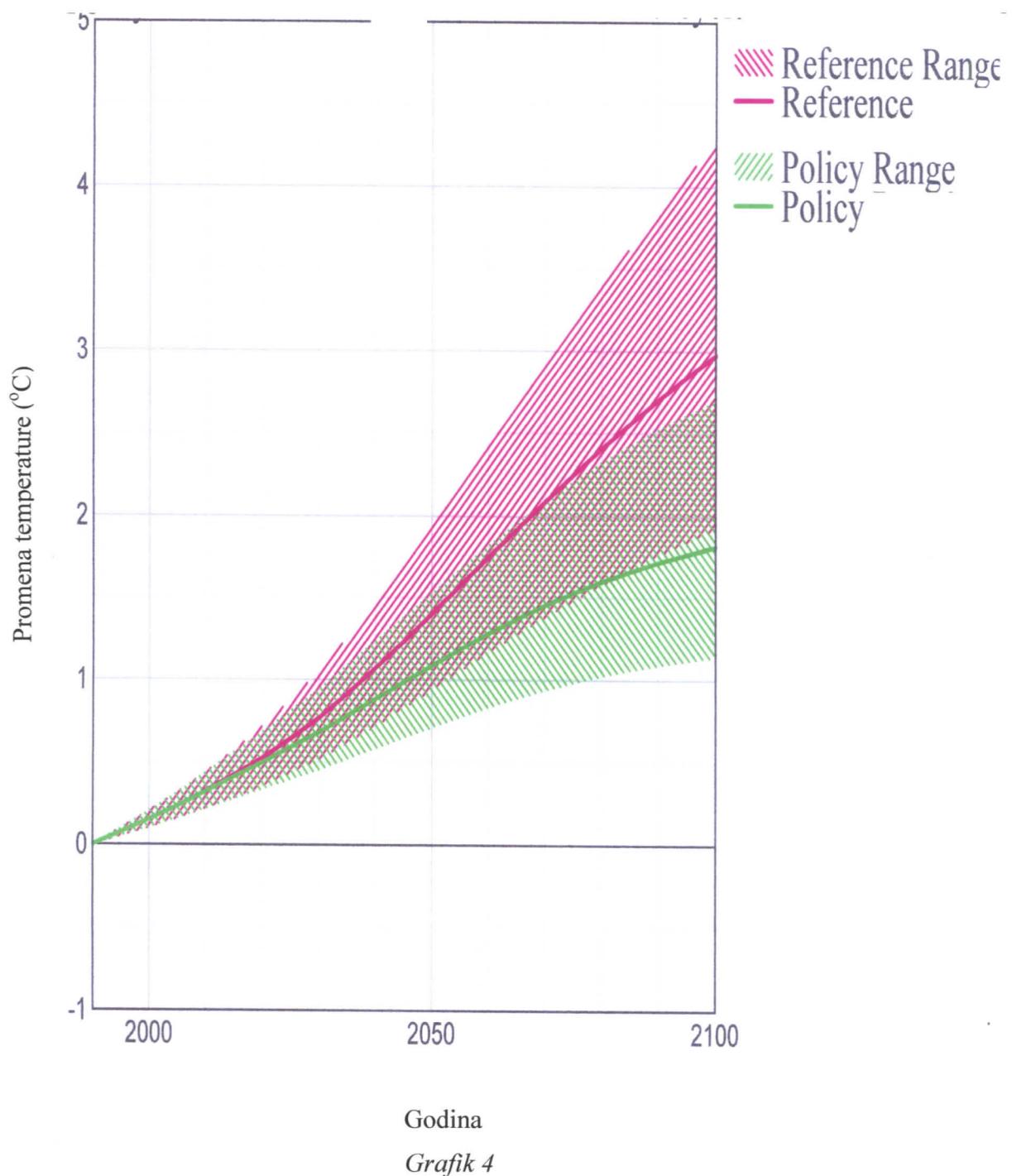
Policy: WRE450: scenario sa uključenom povratnom spregom



Promena temperature (°C)

Reference: SRES P50

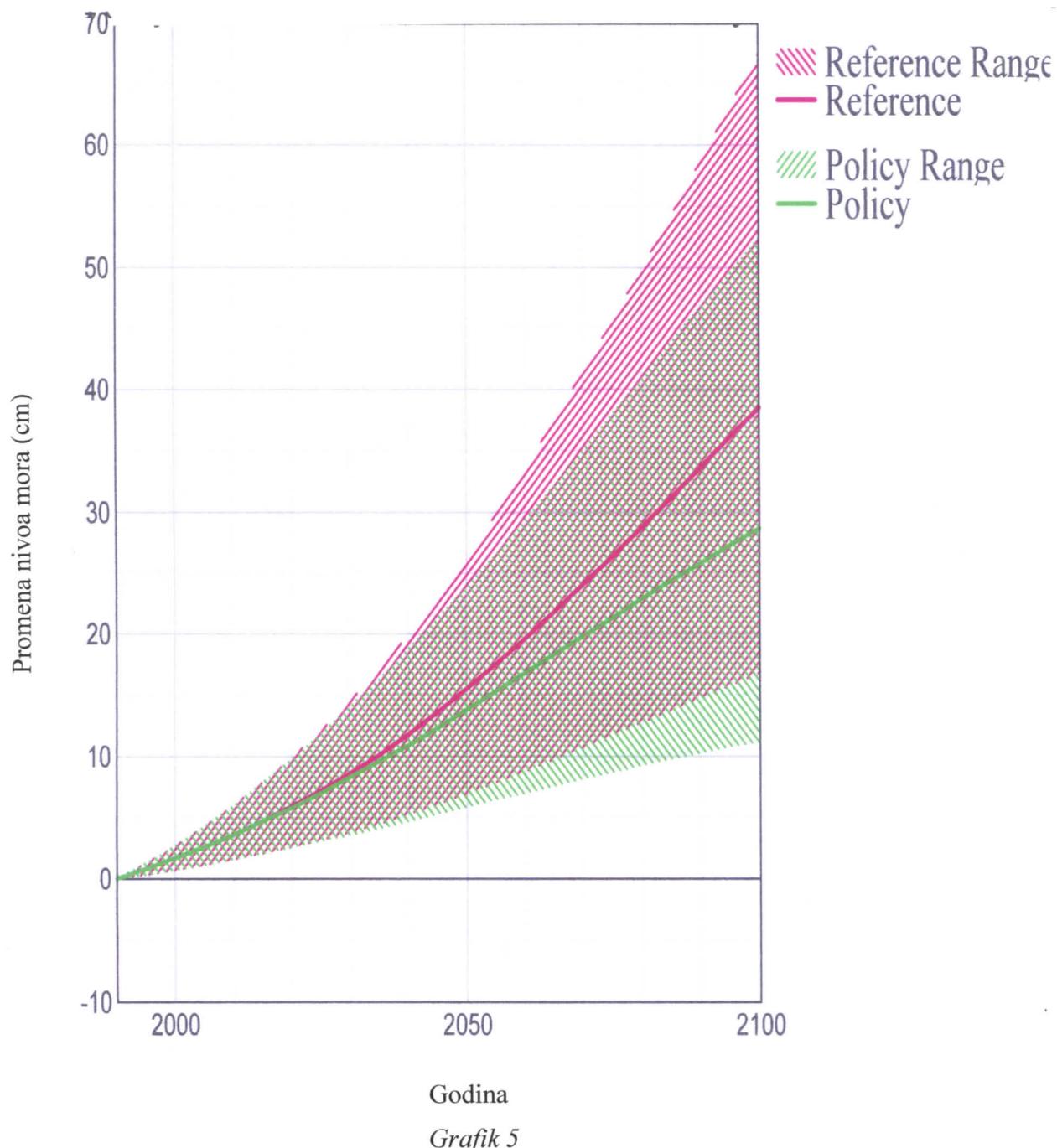
Policy: WRE450: scenario sa uključenom povratnom spregom



Promena nivoa mora (cm)

Reference: SRES P50

Policy: WRE450: scenario sa uključenom povratnom spregom

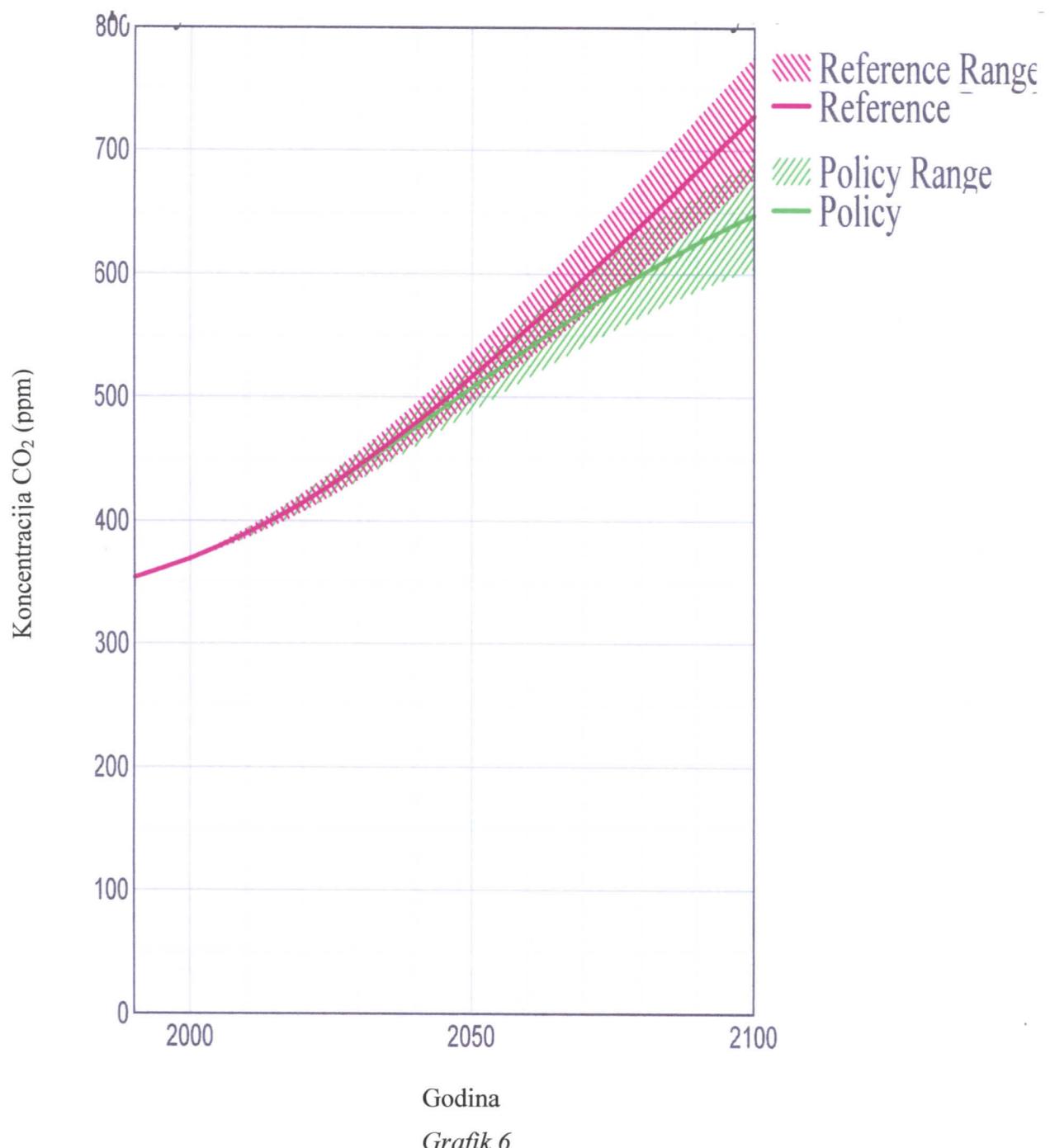


6.2.2 Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa uključenom povratnom spregom WRE750

Koncentracija CO₂(ppm)

Reference: SRES P50

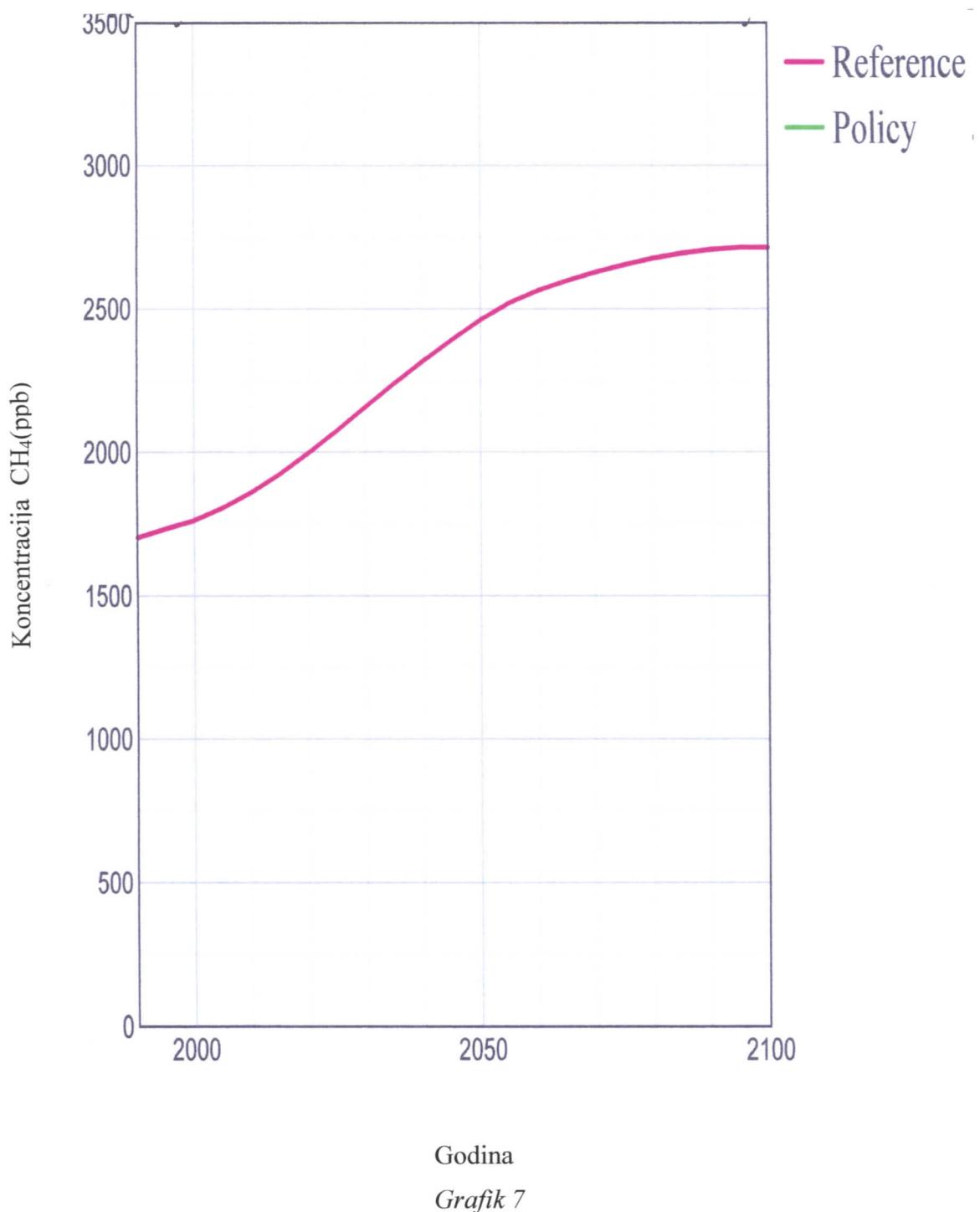
Policy: WRE750: scenario sa uključenom povratnom spregom



Koncentracija CH₄(ppb)

Reference: SRES P50

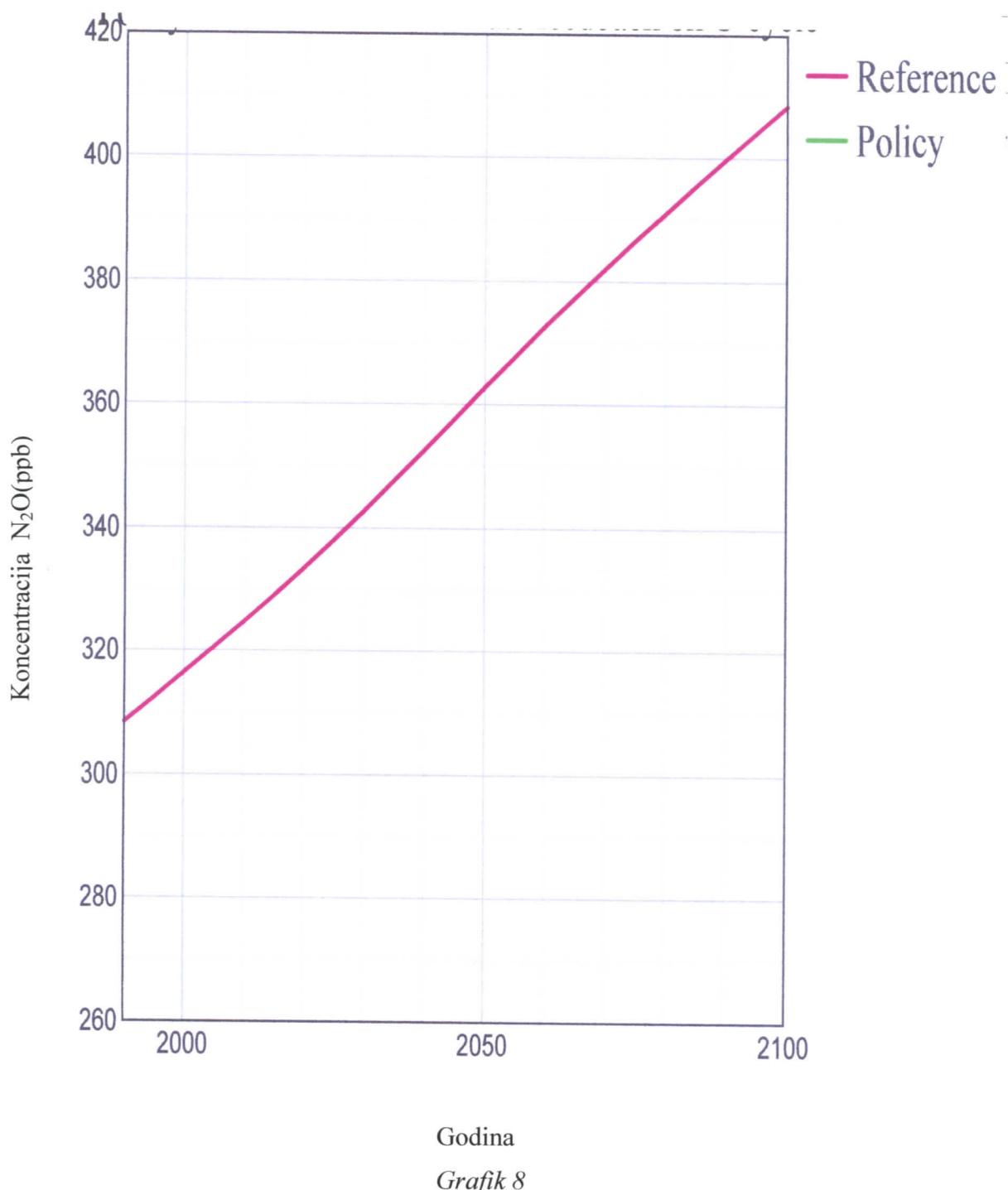
Policy: WRE750: scenario sa uključenom povratnom spregom



Koncentracija N₂O(ppb)

Reference: SRES P50

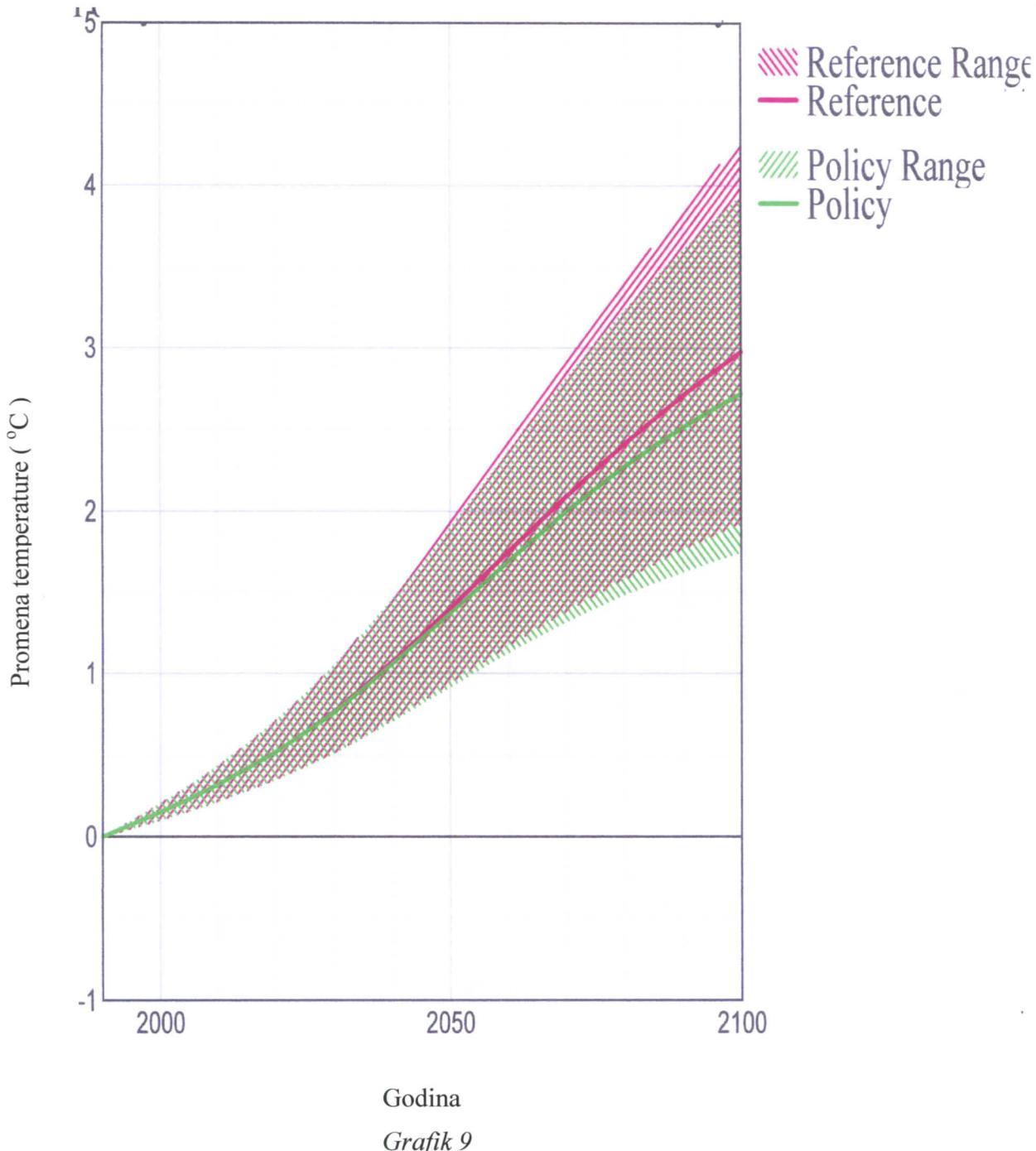
Policy: WRE750: scenario sa uključenom povratnom spregom



Promena temperature (°C)

Reference: SRES P50

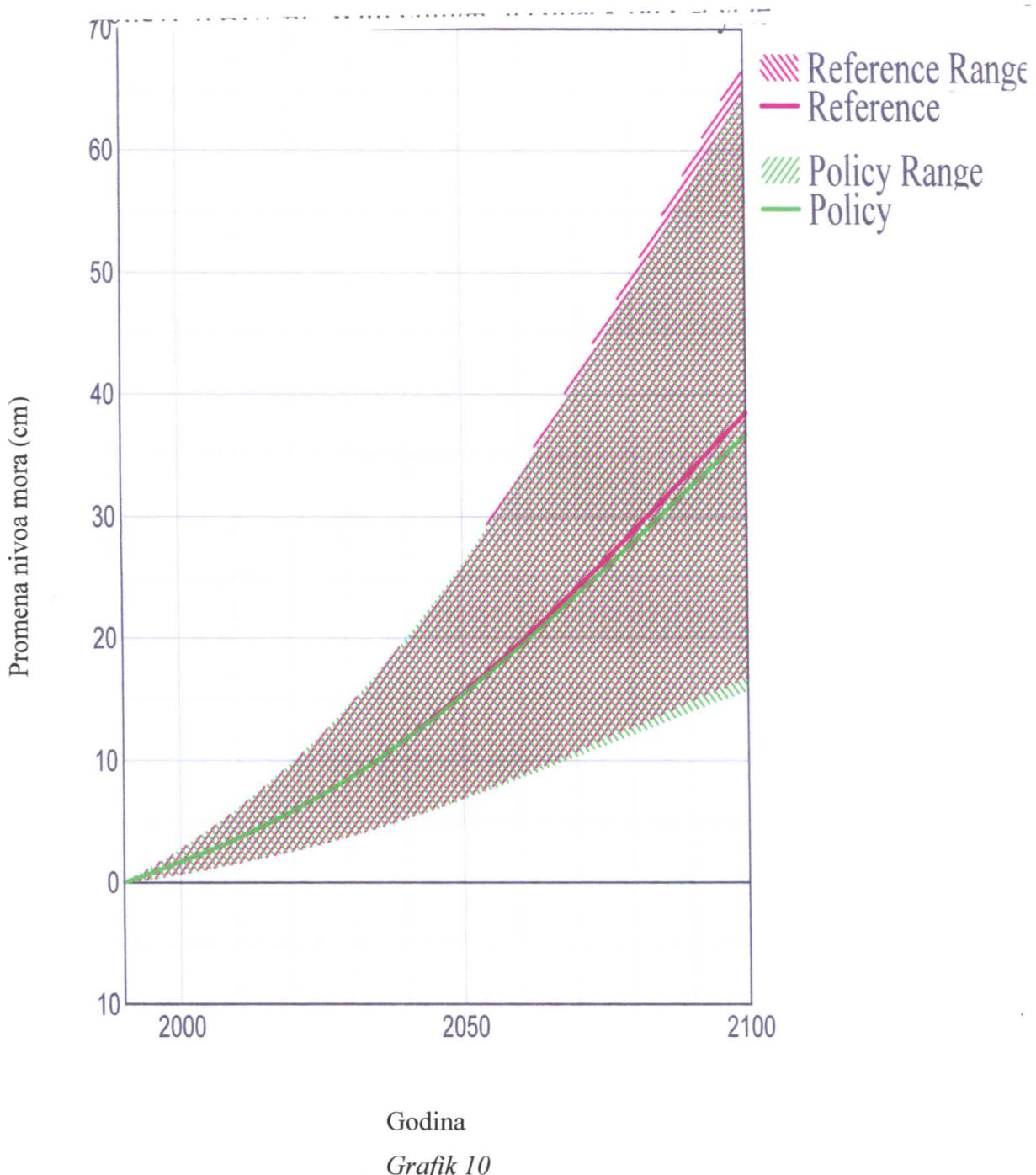
Policy: WRE750: scenario sa uključenom povratnom spregom



Promena nivoa mora (cm)

Reference: SRES P50

Policy: WRE750: scenario sa uključenom povratnom spregom

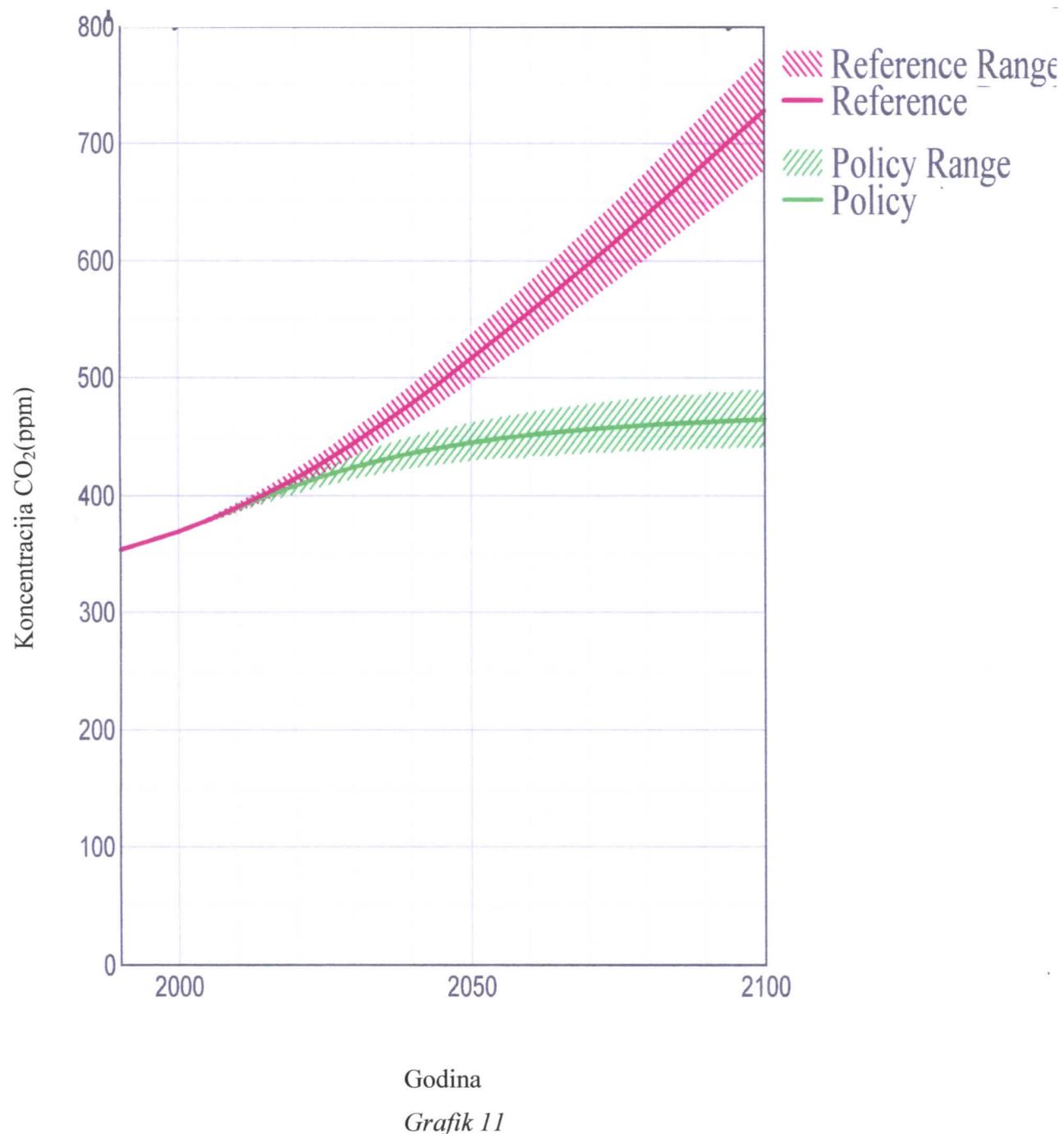


6.2.3 Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa isključenom povratnom spregom NFB450

Koncentracija CO₂(ppm)

Reference: SRES P50

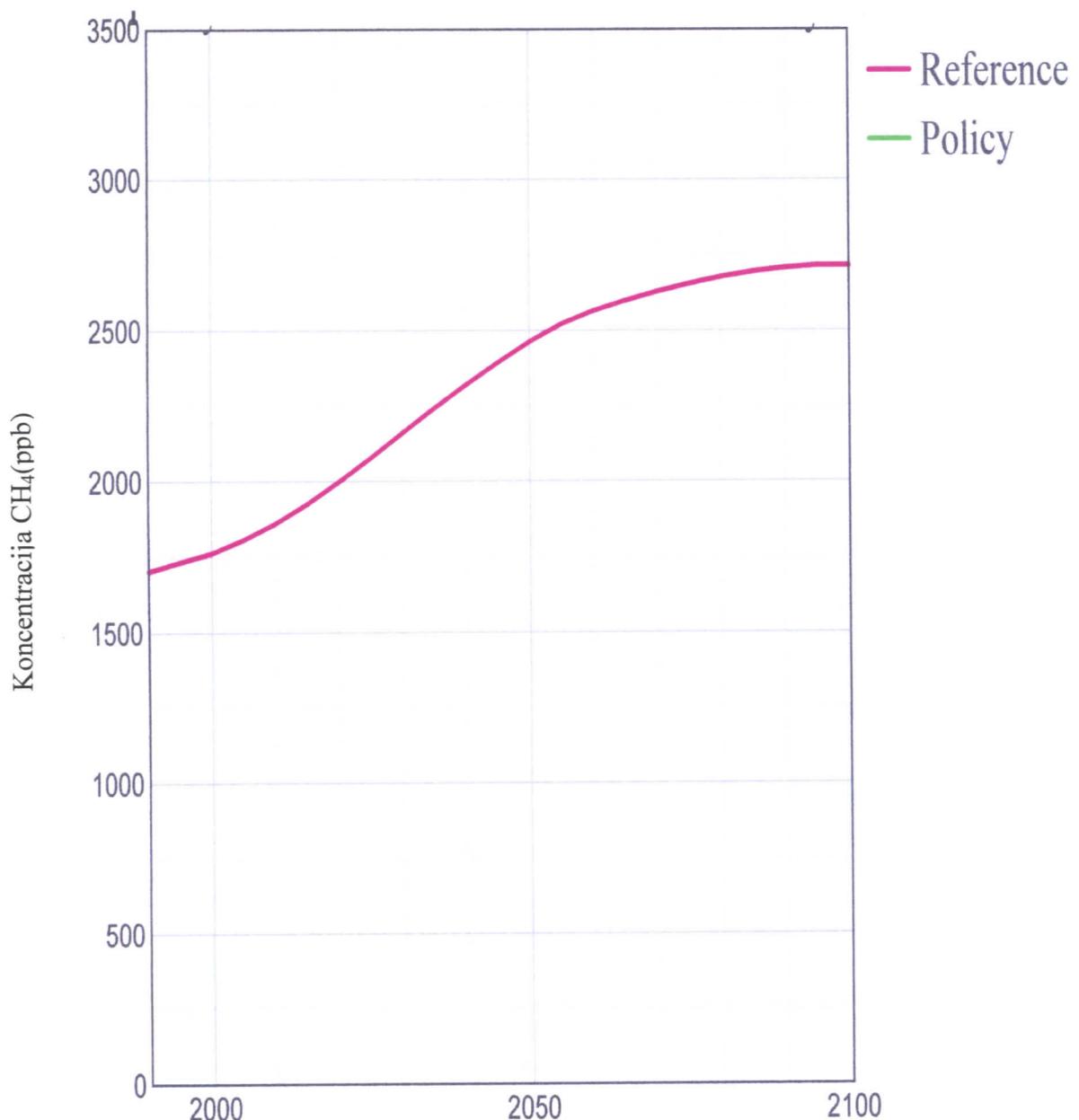
Policy: NFB450: scenario sa isključenom povratnom spregom



Koncentracija CH₄ (ppb)

Reference: SRES P50

Policy: NFB450: scenario sa isključenom povratnom spregom



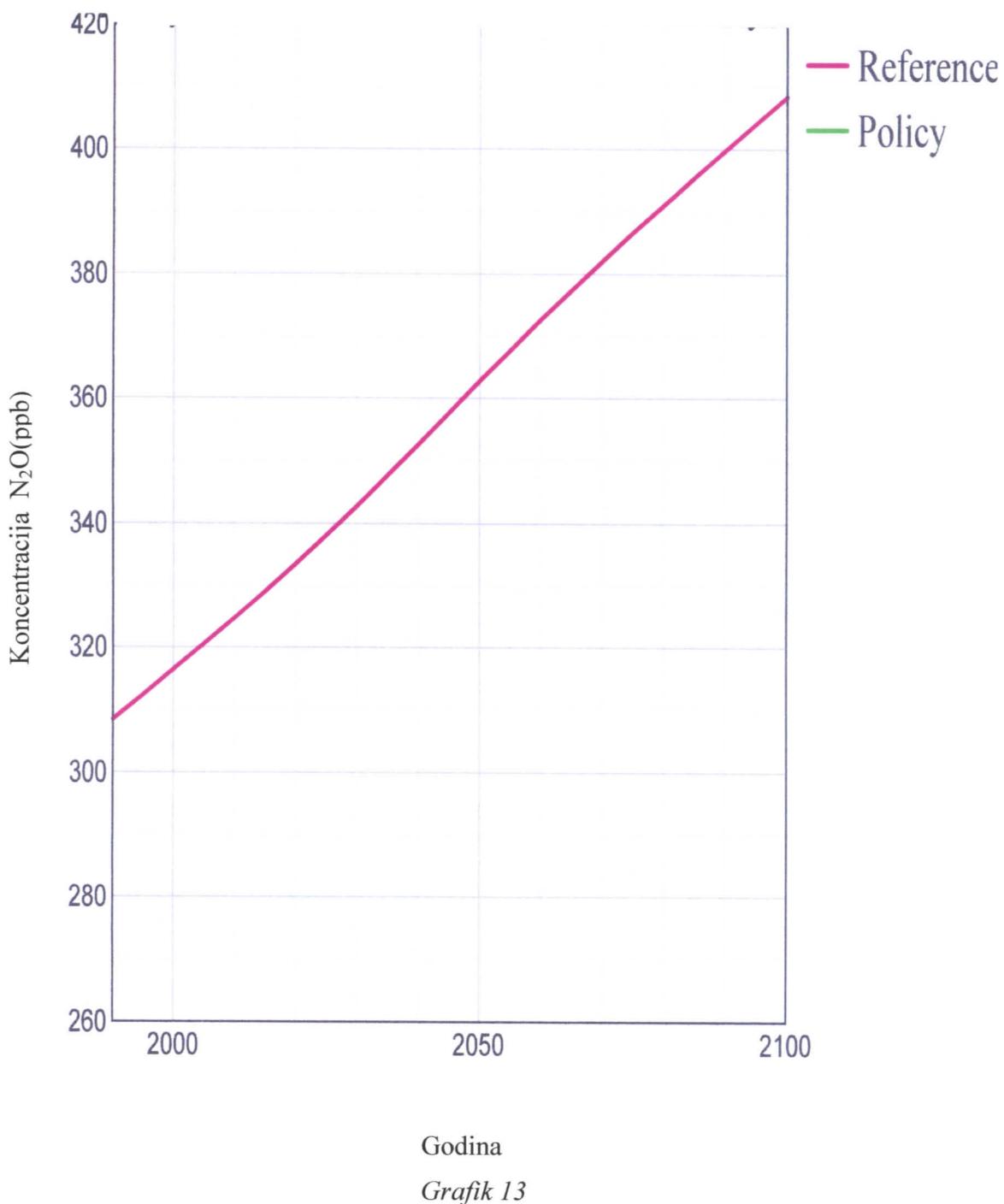
Godina

Grafik 12

Koncentracija N₂O(ppb)

Reference: SRES P50

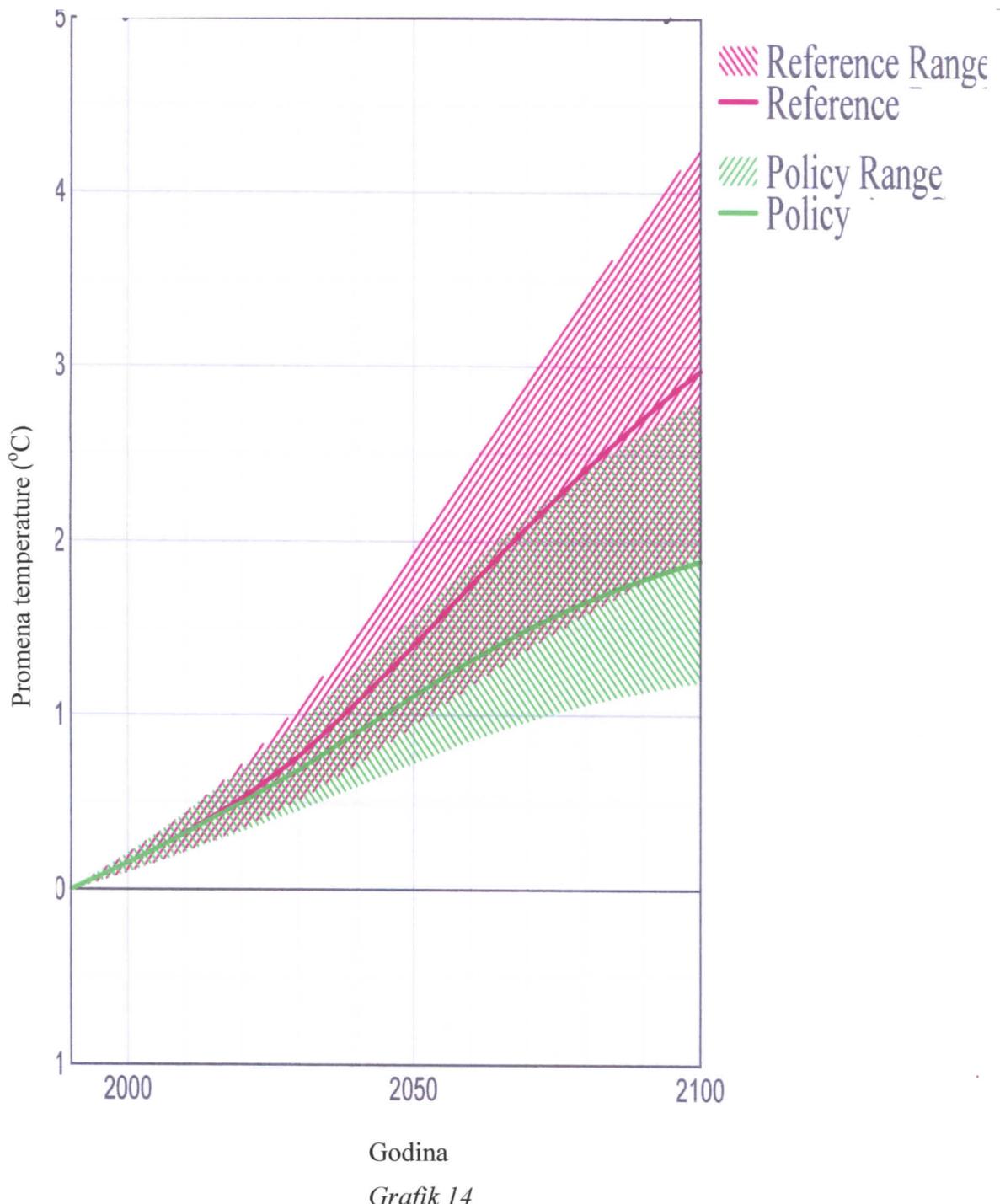
Policy: NFB450: scenario sa isključenom povratnom spregom



Promena temperature (°C)

Reference: SRES P50

Policy: NFB450: scenario sa isključenom povratnom spregom

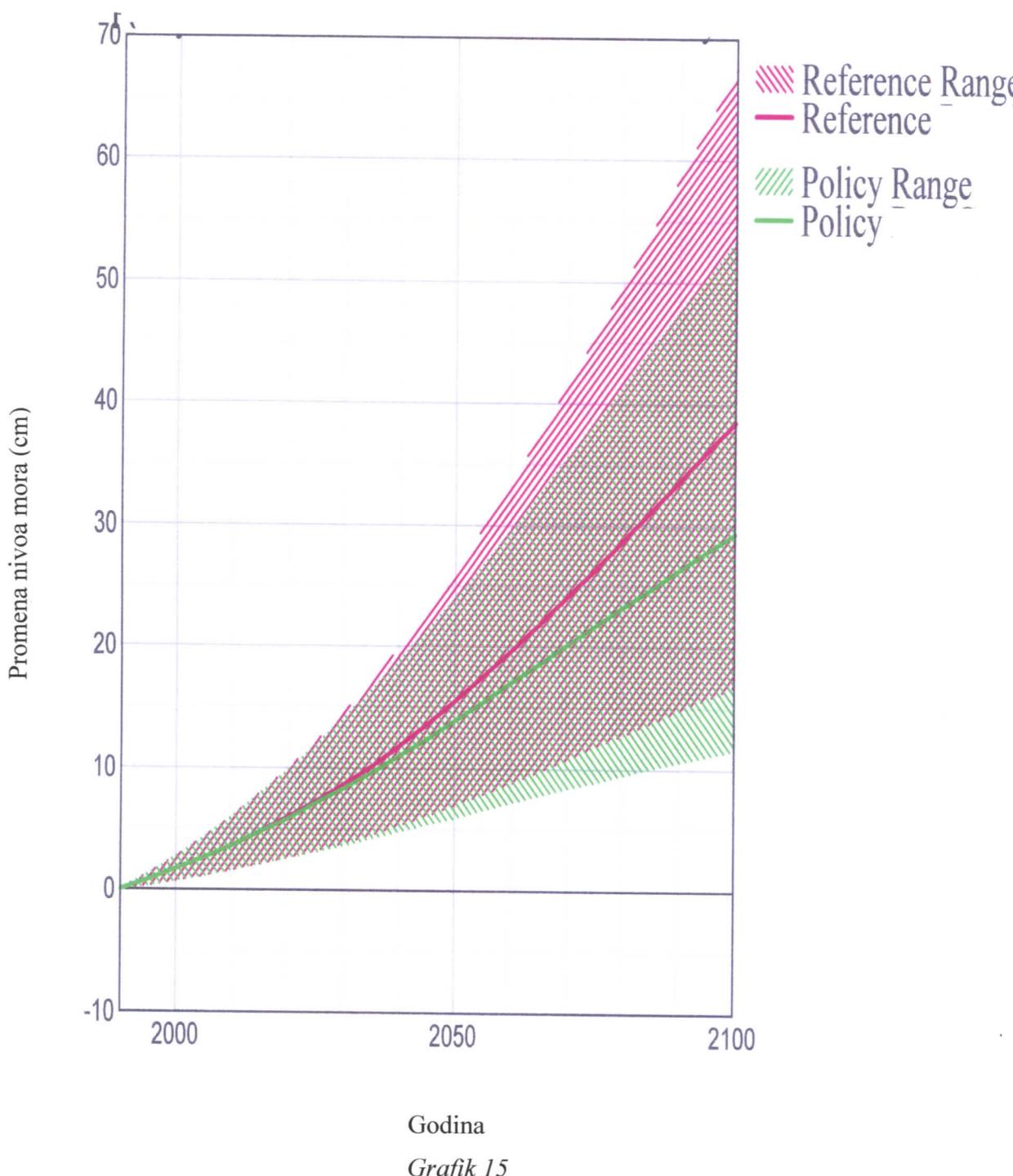


Grafik 14
Godina

Promena nivoa mora (cm)

Reference: SRES P50

Policy: NFB450: scenario sa isključenom povratnom spregom

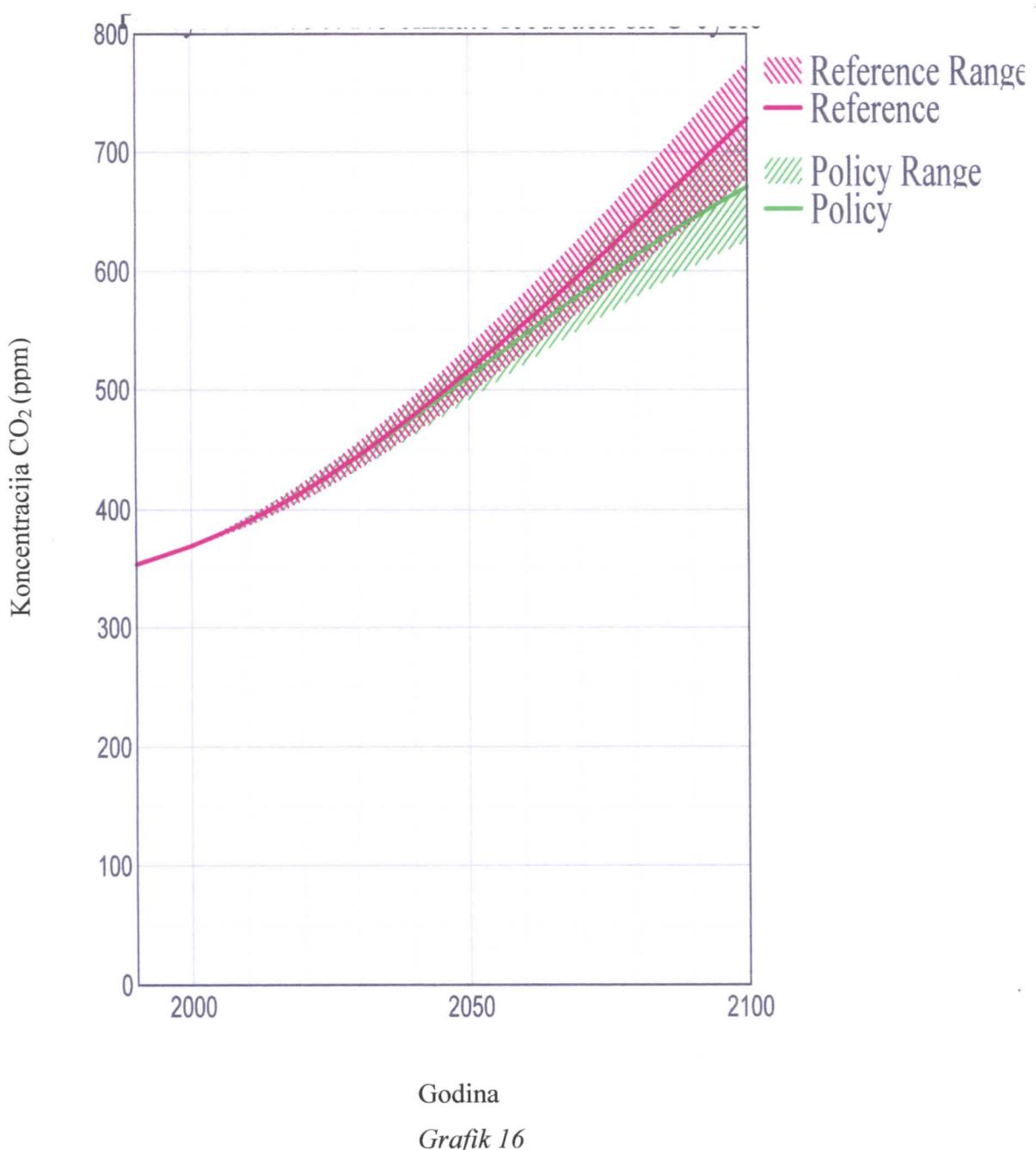


6.2.4 Promena koncentracije, srednje temperature i nivoa mora sa isključenom povratnom spregom NFB750

Koncentracija CO₂(ppm)

Reference: SRES P50

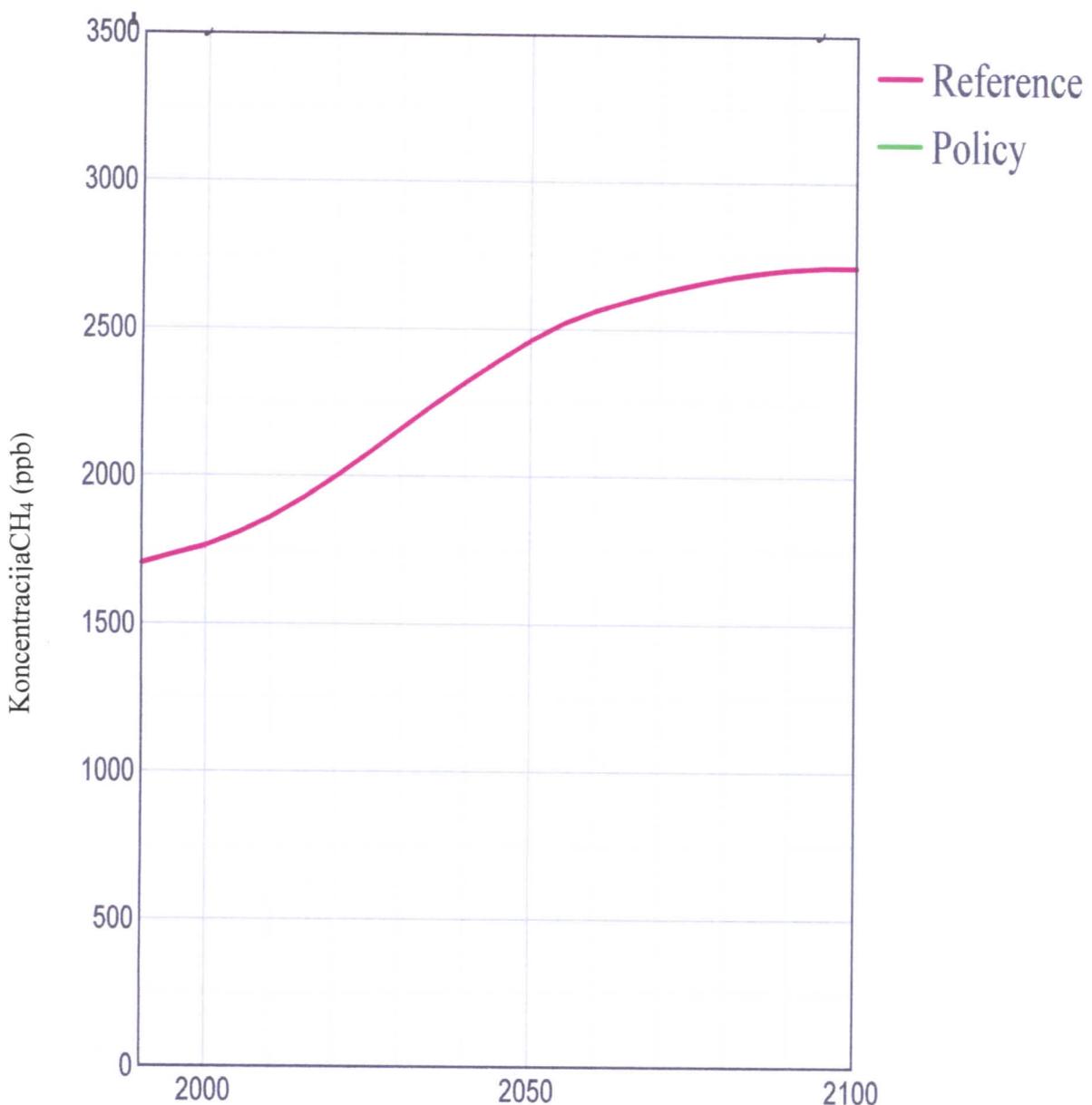
Policy: NFB750: scenario sa isključenom povratnom spregom



Koncentracija CH₄ (ppb)

Reference: SRES P50

Policy: NFB750: scenario sa isključenom povratnom spregom



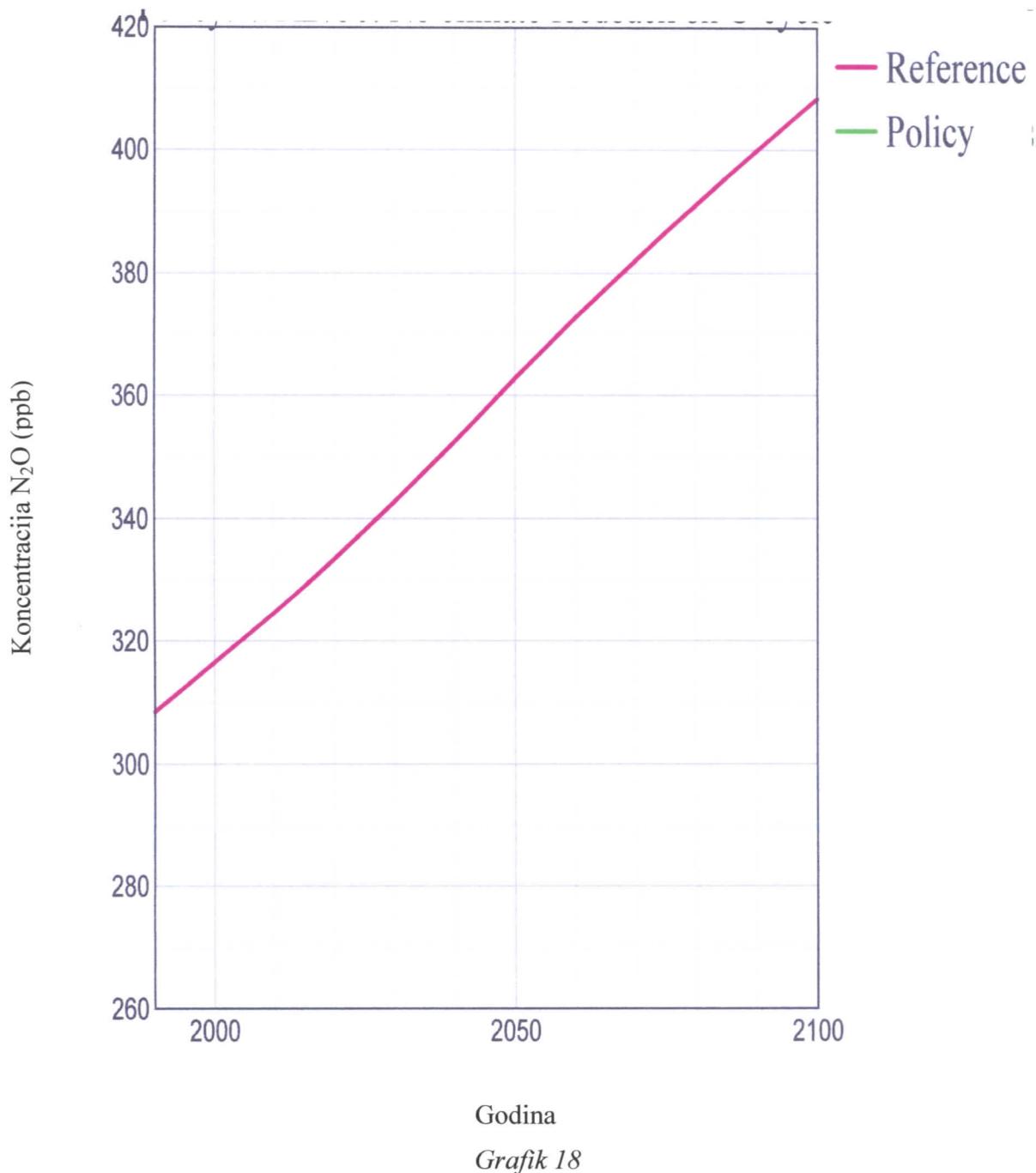
Godina

Grafik 17

Koncentracija N₂O(ppb)

Reference: SRES P50

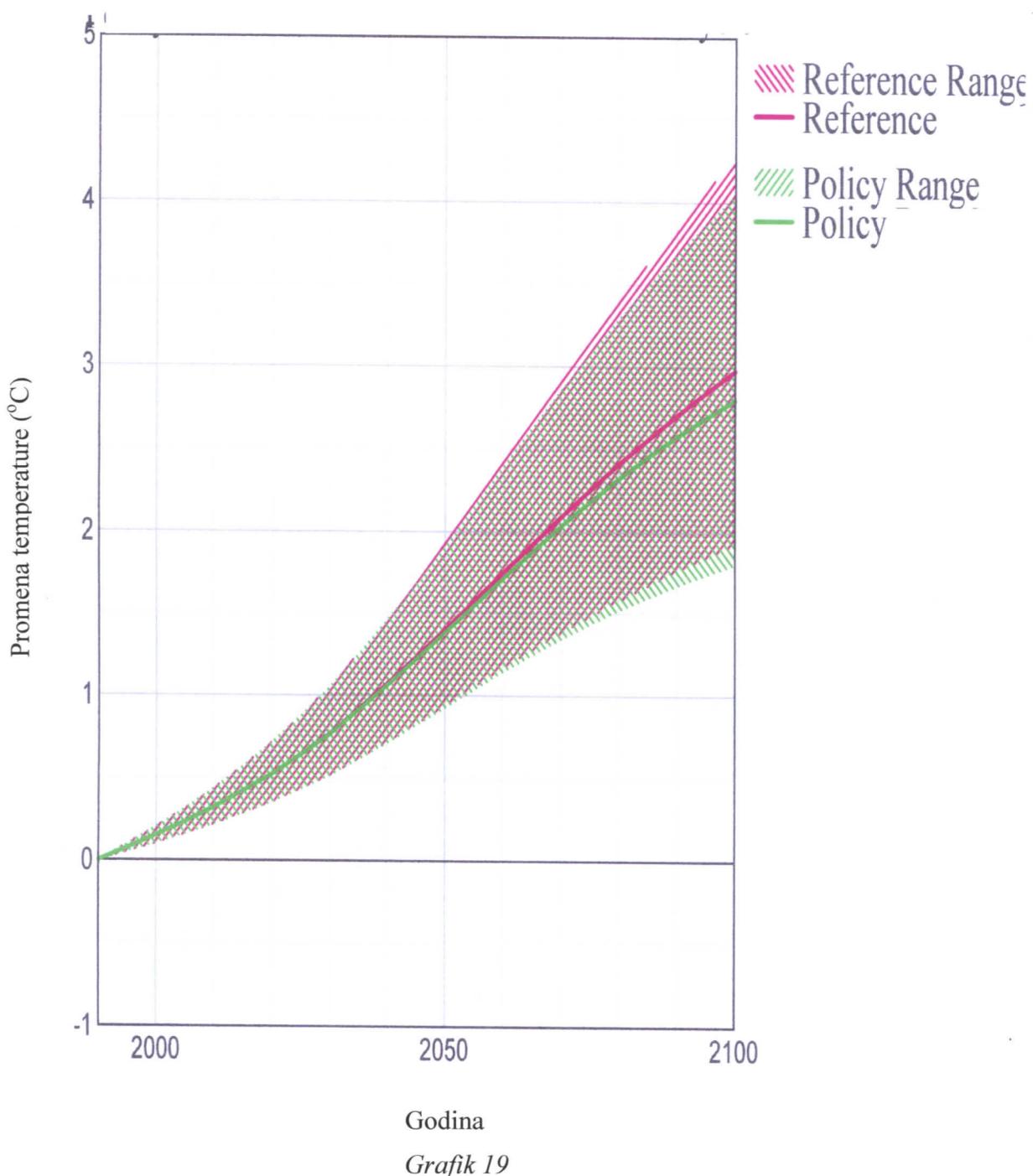
Policy: NFB750: scenario sa isključenom povratnom spregom



Promena temperature (°C)

Reference: SRES P50

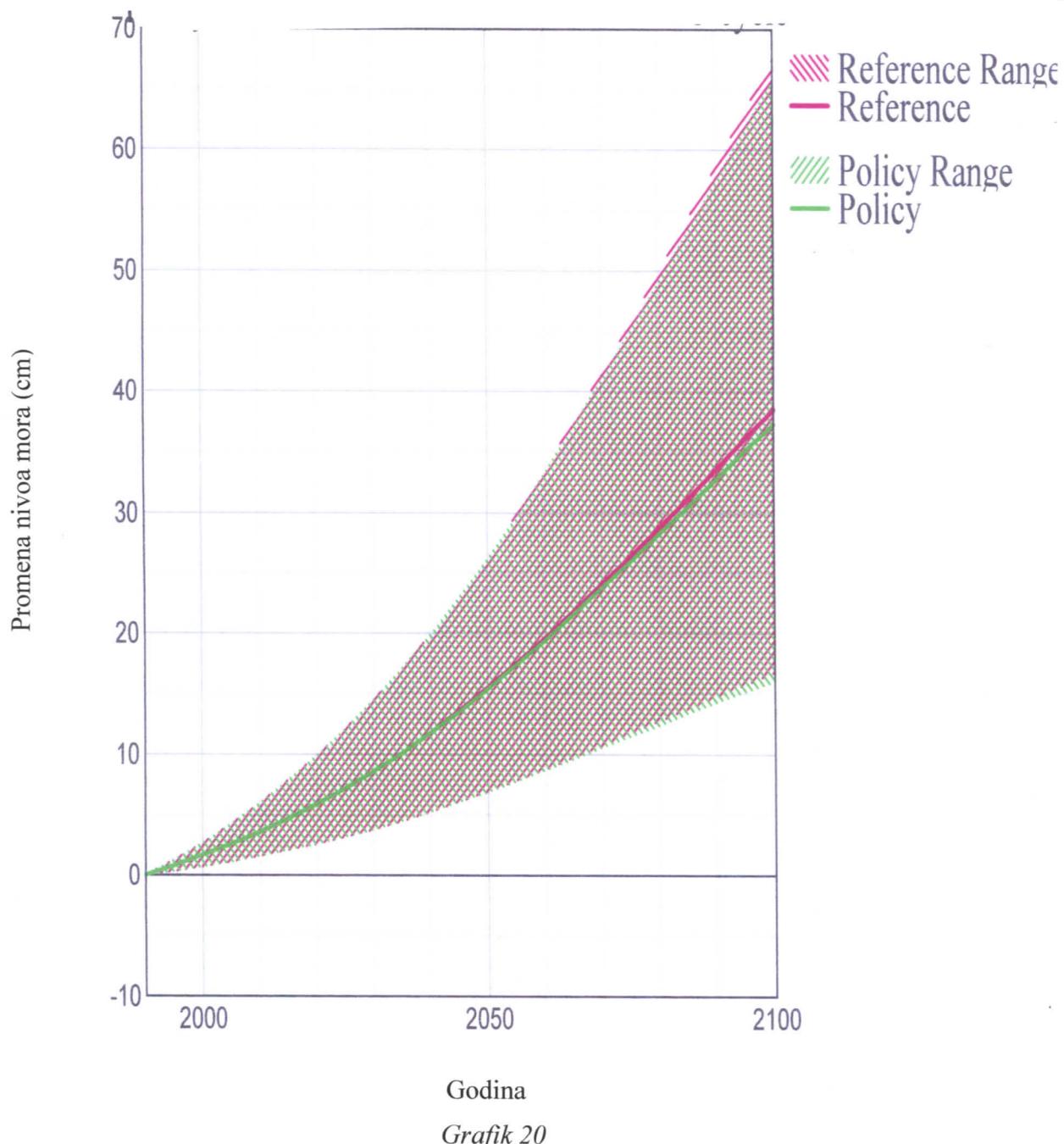
Policy: NFB750: scenario sa isključenom povratnom spregom



Promena nivoa mora (cm)

Reference: SRES P50

Policy: NFB750: scenario sa isključenom povratnom spregom



6.2.5 Analiza rezultata

Kao dodatak SRES scenarijima, dat je reprezentativni Reference scenario P50 (to je srednja vrednost SRES scenarija – koja se sada koristi umesto IS92a). Koncentracije ispod P50 zavise od toga da li je povratna sprega uključena ili ne, tako da sad imamo dva odvojena seta profila koncentracije: jedan koji ignoriše povratnu spregu i drugi koji je uključuje.

Postoji takođe deset emisionih scenarija datih u MAGICC biblioteci: scenarija koji vode do stabilizacione koncentracije CO₂ prateći vrednosti koje su u osnovi iste kao u originalnim WRE profilima. One odgovaraju standardnim stabilizacionim nivoima i datumima, i u slučajevima sa i bez povratne sprege. WRE scenariji će voditi stabilizaciji koncentracije CO₂ ako je korišćen ceo osnovni MAGICC model (koji uključuje i klimatsku povratnu spregu za ugljenikov ciklus). NFB scenariji će voditi stabilizaciju samo ako su povratne sprege isključene. Ako je WRE scenario pokrenut sa isključenom povratnom spregom, koncentracije CO₂ će biti niže; a ako je NFB scenario pokrenut sa uključenom povratnom spregom, koncentracije će biti iznad stabilizacionih normi. Razlike u koncentraciji između ova dva slučaja pokazuju veličinu efekta povratne sprege. Slično, poredeći WRE i NFB emisije za dati nivo stabilizacije će pokazati koliko su značajne klimatske povratne sprege u određivanju emisionih potreba za stabilizaciju.

U diplomskom radu koristimo sledeće emisione scenarije: P50 za "Reference" scenario i WRExxx, odnosno NFBxxx za "Policy" scenario. WRExxx je isti ko i P50 izuzev za CO₂ emisije, koje su modifikovane da prate WRExxx profile koncentracije. Konkretno, "Policy" uzima vrednosti od: WRE450, WRE750, NFB450 i NFB750.

Trenutno MAGICC prikazuje jedino rezultate za CO₂, CH₄ i N₂O. Selektovani prikaz pokazuje koncentracije CO₂ za početni model ugljenikovog ciklusa, za oba scenarija, zajedno sa opsegom nesigurnosti koji je kontrolisan nesigurnostima u okeanskom prinosu i fertilizaciji CO₂. Centralni, ili 'najbolji' rezultati uključuju i efekte klimatske povratne sprege ugljenikovog ciklusa, ali opseg nesigurnosti ne uključuje i nesigurnosti klimatske povratne sprege.

Da bi procenili uticaj nivoa stabilizacije koncentracije CO₂ na neke karakteristike klimatskog sistema najpre ćemo uporediti profile WRE450 i WRE750, kao i NFB450 i NFB750.

Za profile sa uključenom povratnom spregom WRE450 i WRE750 (Grafik 1 i Grafik 6), kao i za profile bez uključene povratne sprege NFB450 i NFB750 (Grafik 11 i Grafik 16) možemo zapaziti da bi u periodu od 1990-2100. po "Reference" scenariju koncentracija CO₂ rasla do 725 ppm. Praktično linearno povećanje je rezultat višestrukih vremenskih skala na kojima ugljenični ciklus deluje. U periodu više vekova procesi na dužim vremenskim skalama (pridruženim dubokim okeanima i zemljiskim zonama) postaju izuzetno važni. Prema "Policy" scenariju oko 2050. godine koncentracija CO₂ bi dostigla vrednost od 450 ppm (Grafik 1). Možemo zapaziti da se do 2010. godine "Policy" i "Reference" scenarija preklapaju za WRE450, a da tada nastupa značajna razlika između dva scenarija. Grafik 6 pokazuje da po "Policy" scenariju do 2100. godine još uvek ne bi došlo do stabilizacije CO₂ i da bi po tom scenariju koncentracija CO₂ 2100. godine dostigla 650 ppm. "Policy" i "Reference" scenarija za WRE750 se preklapaju do 2045. godine, a onda nastaje mnogo manje razdvajanje nego u slučaju WRE450. Zaključujemo da bi profil WRE450 koji uključuje povratne sprege u posmatranom periodu doveo do stabilizacije koncentracije CO₂, dok se profil WRE750 ponaša na sličan način kao P50.

Za koncentraciju CH₄, WRE450 (Grafik 2) i WRE750 (Grafik 7) scenarija su isti

kao i u slučaju NFB450 (Grafik 12) i NFB750 scenarija (Grafik 17), jer stabilizacija CO₂ ne utiče na koncentraciju CH₄. Za CH₄ koji ima atmosfersko vreme života 10-12 godina, koncentracija se efektivno stabilizuje posle 4-5 vremena života. "Reference" i "Policy" scenarij se preklapaju.

N₂O ima vreme života oko 120 godina života tako da koncentracija linearno raste u periodu od 100 godina i ista je za scenarija sa uključenim povratnim klimatskim spregama (Grafik 3 i Grafik 8) i sa isključenim povratnim spregama (Grafik 13 i Grafik 18). Pretpostavka je da bi se koncentracija stabilizovala posle 4 do 5 vremena života, za razliku od CO₂ gde dugi vremenski procesi postaju veoma važni u periodu tokom nekoliko vekova. Ponovo se "Reference" i "Policy" scenarij preklapaju.

Kontinualno povećanje CO₂ koncentracije po "Reference" scenariju osigurava srednje otopljanje u celom periodu do 2100. godine i sa uključenom povratnom spregom (Grafik 4 i Grafik 9) i u slučaju kada povratna sprega nije uzeta u obzir (Grafik 14 Grafik 19). Za WRE450 profil za "Policy" scenario temperatura bi porasla upola manje u odnosu "Reference" scenario. Vidimo na Grafiku 4 da je oblast između krive po "Reference" i "Policy" scenariju oblast gde se opsezi nesigurnosti oba scenarija preklapaju. Za WRE750 profil promene temperature za "Policy" i "Reference" scenarija se praktično preklapaju u većem delu perioda. "Policy" scenario dostiže neznatno nižu temperaturu, a opsezi nesigurnosti oba scenarija se takođe preklapaju. U razmatranom periodu od 2000. do 2100. godine, ukoliko bi se koncentracija CO₂ stabilizovala na 750ppm sa uključenim povratnim spregama, temperatura bi po "Policy" scenariju porasla za 1 stepen više nego u slučaju stabilizacije na 450ppm, što je značajna razlika.

Nivo mora linearno raste i za "Policy" i za "Reference" scenario i za profile sa uključenim povratnim klimatskim spregama (Grafik 5 i Grafik 10) i sa isključenim povratnim spregama (Grafik 15 i Grafik 20), što je logično s obzirom da su vremenske skale koje pokrivaju procese vezane za okeane mnogo duže. Za profil WRE450 nivo mora po "Policy" scenariju bi 2100. godine bio desetak centimetara niži nego u slučaju P50, a opsezi nesigurnosti se u velikom intervalu preklapaju. Situacija je slična i za WRE750, s tim što se oba scenarija preklapaju do 2065. godine, kada nastaje samo neznatno razdvajanje, a opsezi nesigurnosti se praktično preklapaju. Na grafiku 10 vidimo da bi nivo mora 2100. godine bio niži samo za 1-2 cm u odnosu na "Reference" scenario.

Prema "Policy" scenariju za profil sa isključenom povratnom spregom NFB450 (Grafik 11) oko 2050. godine koncentracija CO₂ bi dospjela vrednost od 450 ppm, ali bi nastavila u manjoj meri linearno da raste, tako da bi 2100. godine bila za desetak ppm viša. Ponovo se za NFB450 do 2010. godine "Policy" i "Reference" scenario preklapaju, a da tada nastupa značajna razlika između dva scenarija. Grafik 16 pokazuje da po "Policy" scenariju do 2100. godine još uvek ne bi došlo do stabilizacije CO₂ i da bi po tom scenariju koncentracija CO₂ 2100. godine dospjela oko 675 ppm. "Policy" i "Reference" scenario za NFB750 se preklapaju do 2050. godine, a onda nastaje mnogo manje razdvajanje. Površina između dve krive je oblast gde se opsezi nesigurnosti oba scenarija preklapaju. Zaključujemo da profil NFB450 koji isključuje povratne sprege u posmatranom periodu još uvek ne bi doveo do stabilizacije koncentracije CO₂, što se dešava u slučaju WRE450, dok se profil NFB750 ponaša na sličan način kao P50 i WRE750.

Po "Policy" scenariju profila NFB450 (Grafik 14) temperatura bi porasla nešto manje. Zapravo, situacija je slična kao i u slučaju WRE450 (Grafik 4). "Policy" i "Reference" scenario za profil NFB750 (Grafik 19) se preklapaju kao i u slučaju WRE750 (Grafik 9). "Policy" scenario dostiže neznatno nižu temperaturu, a opsezi

6. Uticaj stabilizacije koncentracije CO₂ na buduće koncentracije CO₂, CH₄, N₂O, promenu srednje temperature i nivoa mora

nesigurnosti oba scenarija se takođe preklapaju. U razmatranom periodu od 2000. do 2100. godine, ukoliko bi se koncentracija CO₂ stabilizovala na 750 ppm sa isključenim povratnim spregama, temperatura bi po "Policy" scenariju ponovo bila za oko 1 stepen viša nego u slučaju stabilizacije na 450 ppm.

Za profil NFB450 nivo mora (Grafik 15) po "Policy" scenariju bi 2100. godine bio ponovo desetak centimetara niži nego u slučaju P50, a opsezi nesigurnosti se u velikom intervalu preklapaju. Dakle, situacija je praktično ista kao i za nivo mora za profil WRE450 (Grafik 5). Za profil NFB750 nivo mora (Grafik 20) se za oba scenarija preklapa praktično do 2080. godine, kada nastaje samo neznatno razdvajanje, a opsezi nesigurnosti se praktično preklapaju. Na grafiku 20 vidimo da bi nivo mora 2100. godine bio niži samo za 1-2 cm u odnosu na "Reference" scenario.

Da bi procenili uticaj uključenja povratnih sprega na karakteristike klimatskog sistema najpre ćemo uporediti profile WRE450 i NFB450, kao i WRE750 i NFB750.

Kao što smo rekli, prema "Policy" scenariju za profil WRE450 oko 2050. godine koncentracija CO₂ bi dostigla vrednost od 450 ppm (Grafik 1) i tu vrednost bi zadržala do 2100. godine, tj. došlo bi do stabilizacije koncentracije CO₂. Prema "Policy" scenariju za profil sa isključenom povratnom spregom NFB450 (Grafik 11) oko 2050. godine koncentracija CO₂ bi dostigla vrednost od 450 ppm, ali bi nastavila u manjoj meri linearno da raste, tako da bi 2100. godine bila za desetak ppm viša. Na Grafiku 6 smo zapazili da po "Policy" scenariju do 2100. godine još uvek ne bi došlo do stabilizacije CO₂ i da bi po tom scenariju koncentracija CO₂ 2100. godine dostigla 650 ppm. "Policy" i "Reference" scenarija za WRE750 se preklapaju do 2045. godine. Grafik 16 pokazuje da po "Policy" scenariju do 2100. godine još uvek ne bi došlo do stabilizacije CO₂ i da bi po tom scenariju koncentracija CO₂ 2100. godine dostigla oko 675 ppm. Dakle, razlika između WRE750 i NFB750 je neznatna i iznosila bi svega 10-30 ppm. Iz svega navedelog, da se zaključiti da uključenje povratne sprege ima veoma mali uticaj na koncentraciju CO₂.

Poredeći profile sa uključenom i isključenom povratnom spregom za porast temperature i nivo mora, situacija je slična. Uticaj klimatske povratne sprege na model ugljenikovog ciklusa je relativno mali, što dovodi do malo manje promene temperature nego kad su isključene. Za veći emisioni scenario (750) uticaj klimatske povratne sprege je ipak veći. Ako bi u korisničkom modelu bila izabrana veća klimatska osetljivost, onda bi uticaj klimatske povratne sprege bio veći.

Kao rezultat smo dobili da su efekti klimatskih povratnih sprega veoma mali. Ipak, treba imati u vidu da ovaj rezultat krije veoma velike nesigurnosti koje okružuju kvantifikaciju ovih povratnih sprega. Rezultati klimatskih povratnih sprega koje MAGICC proizvodi su oko polovine povratnih sprega koje proizvode dva prvobitna modela ugljeničnog ciklusa korišćena u TAR: Joos et al. (BERN) i Jain/Kheshgi (ISAM) modeli. Neki drugi modeli daju znatno veće efekte povratnih sprega.

Ipak, nesigurnosti koje se dovode u vezu sa povratnim spregama su male u poređenju sa nesigurnostima koje proizilaze iz relativno nedovoljnog znanja o veličini klimatske osetljivosti.

6.3. Zaključak

Ispitali smo kako povećano zagrevanje staklene bašte utiče na amplitudu kolebanja klimatskih parametara. MAGICC model uključuje scenarija koji vode do stabilizacione koncentracije CO₂, i to u slučajevima sa i bez povratne klimatske sprege.

MAGICC nam omogućava da odredimo globalnu srednju temperaturu i njen uticaj na nivo mora i okeana na osnovu emisivnosti gasova. U analizi smo razmatrali ulogu intenziteta povratne sprege zbog oblaka i vremenskog razmora klimatskih fluktulacija, i pokazali koliko su značajne klimatske povratne sprege u određivanju emisionih potreba. Model pokazuje kontinualno povećanje CO₂ koncentracije u celom periodu do 2100-te godine i nakon toga bi došlo do stabilizacije koncentracije CO₂, što osigurava srednje otopljavanje u celom periodu do 2100-te godine, dok istovremeno nivo mora linearno raste. Iz svega navedenog možemo zaključiti da uključenje povratne sprege ima veoma mali uticaj na koncentraciju CO₂. Kao rezultat smo dobili da su efekti klimatskih povratnih sprega veoma mali. Ipak, treba imati u vidu da ovaj rezultat krije veoma velike nesigurnosti koje okružuju kvantifikaciju ovih povratnih sprega. Rezultati klimatskih povratnih sprega koje MAGICC proizvodi su oko polovine povratnih sprega koje proizvode dva prvobitna modela. Neki drugi modeli daju znatno veće efekte povratnih sprega.

Literatura:

1. Houghton, John 1997. Global Warming: *the Complete Briefing*. Cambridge University Press, 251 pp.
2. IPCC 2001. Climate Change 2001: *Mitigation Contribution of Working Group III to the Third Assessment*, str. 2-14.
3. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, Lead Authors: Paulo Artaxo (Brazil), Terje Berntsen (Norway), Richard Betts (UK), David W. Fahey (USA), James Haywood (UK), Judith Lean (USA), David C. Lowe (New Zealand), Gunnar Myhre (Norway), John Nganga (Kenya), Ronald Prinn (USA, New Zealand), Graciela Raga (Mexico, Argentina), Michael Schulz (France, Germany), Robert Van Dorland (Netherlands) str. 137-153 i 199-215.
4. Krzysztof Szilder, Edward P. Lozowski, Gerhard W. Reuter: A stochastic model of global atmospheric response to enhanced greenhouse warming with cloud feedback. *Atmospheric Research*, str. 47-48 (1998) , str.475-489.
5. Radinović Đuro, 1984: *Klimatologija-opšta i regionalna* . Prirodno matematički fakultet Univerziteta u Beogradu i Jugoslovenski zavod za produktivnost rada i informacione sisteme, str. 70-91 i 95-97.
6. Broccoli, A. J., and S. Manabe, 1990: Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate? *Geophysical Research Letters*, 17(11), 1917-1920.
7. Butzer, K.W. (1980) Adaptation to Global Environmental Change. *Professional Geographer* 32 (3), 269-278.
8. C.E. Leith, "Numerical Simulation of the Earth's Atmosphere," in *Methods in Computational Physics*, eds.B. Alder, S. Fernbach, and M. Rotenberg (New York:Academic Press, 1963),1 28
9. Cess, Rd. "Comparison of General Circulation Models to Earth Radiation ... 236-247, 1991
10. Charllock, T.P., 1982: Cloud Optical Feedback and Climate Stability in a Radiative-Convective Model. 'Tellus'34'245-254.
11. Charlson, R.J., et al. (1987). "Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulfur, Cloud Albedo and Climate", *Nature Vol. 326*, PP 655-661.
12. Clark, D.B. and D.A. Clark. 2006. *Annual tree growth, mortality, physical condition and microsite in an old-growth lowland tropical rain forest*, 1983-2000.
13. Cotton W. R., and R. A. Anthes, 1989: *Storm and Cloud Dynamics*. Academic Press, 883 pp.
14. Daniel A. Lashof (1989). "The dynamic greenhouse: Feedback processes that may influence future concentrations of atmospheric trace gases and climatic change". *Climatic Change* 14 (3): 2
15. Dickinson, Re, Errico, Rm, Giorgi,F, Bates, gt. "A Regional Climate Model for the Western United-States." *Clim. Change* 15: 383, 1989. ...
16. Emanuel, K. A. 1987. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*
17. Fedorov A.V., R.C. Pacanowski, S. G. Philander and G. Boccaletti: The effect of salinity on the wind-driven circulation and the thermal structure of the upper ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1949-1966, 2004.

18. G. Collins : *the Factory or Assembly-line paintings* 1991,
19. Gaetz Floeser, Springer Science, *Antropogenic Climatic Change' Storch, HV*, 1991. 364 pp.
20. Garatt JR (1992) *The atmospheric boundary layer*. Cambridge: Cambridge University Press, 316 pp.13-242.
21. Hansen, J., A. Lacis, and D. Rind, 1984: Climate trends due to increasing greenhouse gases. In *Proceedings of the Third Symposium on Coastal and Ocean Management, ASCE/San Diego, California, June 1-4, 1983*, pp. 2796-2810.
22. Hunten, D.M., L. Colin, and J.E. Hansen, 1986: Atmospheric science on the Galileo mission. *Space Sci. Rev.*, 44, 191-240, doi:10.1007/BF00200817.
23. Kellogg, W. in Climate Variations and Variability: *Facts and Theories* (ed. Berger, A.) 601–621 (Reidel, Dordrecht, 1981).
24. Lian, M. S., and R. D. Cess, 1977: *Energy balance climate models*
25. Manabe, S., and R. T. Wetherald, 1967: Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24(3), 241-259.
26. Manabe, S., and R.T.Wetherald (1980). On the distribution of climate changes resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere, *J. Atmos. Sci.* 37, 99–118.
27. Merrill, R. T. 1988. Environmental influences on hurricane intensification. *J. Atmos. Sci.* 45, 1678-1687.
28. Mitchell, J.F.B., C.A. Senior and W.J. Ingram, 1989: CO₂ and Climate: A Missing Feedback? *Nature*'341'132-134.
29. Moller, F. 1963. *The influence of changes in the CO₂ concentration in air on the radiation balance of the earth's surface and on climate*.
30. Ni, Y.-Q., B. L. Otto-Bliesner, D. D. Houghton, 1987: The sensitivity of the global general atmospheric circulation to the orography specification in a low-resolution spectral model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 4, 1-12.
31. Paltridge, G. W.: 1980, '*Cloud-Radiation Feedback to Climate*',
32. Petukhov, V. K., E. M. Feigel'son, and N. I. Manuilova,Regulating role of clouds in heat effects of anthropogenic aerosol and carbon dioxide, *Izvestiya AN SSSR, Fizika atmosfery i okeana*, 11 (11), 802–808, 1975.
33. Pielke, R.A., 1984: *Mesoscale Meteorological Modeling. 1st Edition*, Academic Press, New York.
34. Pielke, R.A., 1990: *The Hurricane*. Routledge Press, London.
35. Porder, S., D.A. Clark, and P.M. Vitousek. 2006. *Persistence of rock-derived nutrients in the wet tropical forests of La Selva*.
36. Ramanathan, V. 1981 *The role of ocean-atmosphere interactions in the CO₂ climate problem*.
37. Ramaswamy, V. and V. Ramanathan, 1989: *Solar Absorption by Cirrus Clouds and the Maintenance of Upper Troposphere Thermal Structure*.
38. Randall, D. A., et al. (1992), *Intercomparison and Interpretation of Surface Energy Fluxes in Atmospheric General Circulation Models*
39. Roeckner, E., U. Schlese, J. Biecamp and P. Loewe, 1987: Cloud Optical Depth Feedbacks and the Climate Modeling'*Nature*'329'138-140.
40. Schlesinger, M.: 1983, *Atmospheric General Circulation Model Simulations of the Modern Antarctic*
41. Schlesinger, M.E. & Mitchell, J.F.B. *Rev. Geophys.* 25, 760–798 (1987).
42. Silverman and Cooper, 1988: Silverman, J. F. and Cooper, D. B. (1988). "Bayesian clustering for unsupervised estimation of surface and texture models".

43. Somerville, R.C. and L.A. Remer, 1984: Cloud Optical thickness feedbacks in the CO₂ Climate Problem', *J.G.R.*, '89'9668-9672.
44. Spinhirne, J. D., and M. D. King, 1985: Latitudinal variation of spectral optical thickness and columnar size distribution of the El Chichon stratospheric aerosol layer. *J. Geophys. Res. (Atmos.)*, 90, 10607-10619.
45. W.H.Peterson and Barron E.J. : Mid-Cretaceous ocean circulation: *Paleoceanography* 1990.
46. Wunsch, C. in *Proc. Workshop on Global Observation and Understanding of the General Circulation of the Oceans* (U.S. National Academy of Sciences, Washington D.C., 1983).
47. Zhang, D.-L., and R.A. Anthes, 1982: A *high-resolution model of the planetary boundary*
48. "Vreme" br. 649. od 12. juna 2003 .

Web adrese

49. www.ipcc.ch
50. www.dadalos.org/srbija/Sonstiges/uebersicht.htm
51. www.meteo.noa.gr/BalkanClimate/leaflets_pdf/leaflet_Yugoslavian.pdf
52. [www.hidmet.sr.gov.yu/podaci/ipcc/4_izvestaj_radne_grupe_3_ublazavanje\(srpski\).pdf](http://www.hidmet.sr.gov.yu/podaci/ipcc/4_izvestaj_radne_grupe_3_ublazavanje(srpski).pdf)



Biografija



Rodena sam 26.11.1980. u Bačkoj Palanci. Završila sam Osnovnu školu "Braća Novakov" u Silbašu. Godine 1994. upisala sam srednju Hemijsko-tehnološku školu „Đorđe Zličić“ u Novom Sadu. Po završetku srednje škole, godine 1999. upisala sam Prirodno-matematički fakultet, odsek za fiziku, smer diplomirani fizičar – meteorolog.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Milica Pejak

dr Milica Pavkov-Hrvojević, docent

Uticaj stabilizacije CO₂ na promene srednjeg klimatskog stanja primenom programa MAGICC

Jezik publikacije:

JP

srpski (latinica)

Jezik izvoda:

JI

srpski/engleski

Zemlja publikovanja:

ZP

Srbija

Uže geografsko područje:

UGP

Vojvodina

Godina:

GO

2007.

Izdavač:

IZ

Autorski reprint

Mesto i adresa:

MA

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

6/99/50/52/7

Fizički opis rada:

FO

Fizika

Naučna oblast:

NO

Meteorologija

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

Uticaj stabilizacije CO₂ primenom programa MAGICC

UDK

Čuva se:

ČU

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Važna napomena:

VN

nema

Izvod:

IZ

MAGICC nam omogućava da odredimo uticaj stabilizacije CO₂ na promenu srednje globalne temperature i njen uticaj na nivo mora i okeane na osnovu emisivnosti gasova. Model pokazuje da globalno zagrevanje staklene bašte vodi ka većoj amplitudi klimatskih faktora.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

22.10.2007 godine

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Darko Kapor, redovan profesor PMF, Novi Sad

član:

dr Milica Pavkov-Hrvojević, docent PMF, Novi Sad, mentor

član:

dr Borivoje Rajković, vanredni profesor Fizičkog fakulteta, Beograd

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Milica Pejak
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	dr Milica Pavkov-Hrvojević, assistant professor
MN	
<i>Title:</i>	The influence of CO ₂ stabilization onto the changes of average climate state applying program MAGICC
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2007.
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	6/99/50/52/7
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Meteorology
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	CO ₂ stabilization influence in using MAGICC program
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	MAGICC allows us to determine the influence of CO ₂ stabilization on the global-mean temperature change and it's influence on sea level rise based on gas greenhouse emisions. Model shows that global increase in forcing temperature leads to higher climate factors amplitude.
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
ASB	
<i>Defended on:</i>	22.10.2007.
DE	
<i>Thesis defend board:</i>	
DB	
<i>President:</i>	Darko Kapor, Ph. D., full professor," Faculty of Natural Sciences-Department of Physics", Novi Sad
<i>Member:</i>	Milica Pavkov-Hrvojević, assistant professor " Faculty of Natural Sciences- Department of Physics", Novi Sad, supervisor
<i>Member:</i>	Borivoje Rajković, Ph. D.,associate professor,"Faculty of Physics ", Beograd