

**Mladi za napredek Maribora 2020,
37. srečanje**

Vpliv koncentracije ogljikovega dioksida v ozračju na toplotno bilanco Zemlje

**FIZIKA
RAZISKOVALNA NALOGA**

Avtor: IZA NOVAK

Mentor: TADEJ CRNJAC, PETER CRNJAC
Šola: II. GIMNAZIJA MARIBOR
Število točk: 134/ 170

Maribor, 2020

Mladi za napredek Maribora 2020,

37. srečanje

Vpliv koncentracije ogljikovega dioksida v ozračju na toplotno bilanco Zemlje

FIZIKA

RAZISKOVALNA NALOGA

Maribor, 2020

KAZALO VSEBINE

KAZALO GRAFOV	4
KAZALO SLIK.....	5
POVZETEK.....	6
ZAHVALA	7
1. UVOD.....	8
1.1 Ključna dejstva in raziskovalna vprašanja	9
1.2 Hipoteze.....	10
1.3 Namen naloge	10
2. TEORETIČNO OZADJE	11
2.1 Podnebni sistem.....	11
2.2 Absorpcija elektromagnetnega valovanja, Beer-Lambertov zakon	12
2.3 Spekter sončnega sevanja	13
2.4 Absorpcija toplogrednih plinov v ozračju	14
2.5 Učinek tople grede	17
3. PODNEBNI MODELI	19
3.1 Energijski ravnovesni model	20
3.2 Linearizacija dolgovalovnega sevanja Zemlje	22
3.3 Enodimenzionalni model sevalne bilance	24
3.4 Diskretizacija vodilne enačbe enodimenzionalnega modela	25
4. PRIMERJAVA Z MODELI SPLOŠNE CIRKULACIJE	26
4.1 Sevalni prispevek ogljikovega dioksida	26
5. MATEMATIČNA FORMULACIJA PROBLEMA	29
5.1 Aproksimacija funkcij.....	29
5.2 Metoda najmanjših kvadratov	29
5.3 Konstrukcija empiričnih formul	30
6. PROGRAMSKI PAKET SCILAB	32
6.1 Numerični algoritem	32
6.2 Preverjanje pravilnosti numeričnega algoritma	32
6.3 Konvergenca rešitve in vpliv začetnih pogojev.....	33
7.4 Vpliv albeda na povprečno temperaturo Zemlje	34
7. EKSPERIMENTALNI DEL.....	36
7.1 Uporabljena eksperimentalna oprema	36
7.2 Merjenje prepustnosti vzorcev za sončno in dolgovalovno sevanje	37

7.3 Potek meritev	38
7.4 Rezultati meritev	40
8. OBDELAVA REZULTATOV MERITEV	43
8.1 Linearna aproksimacijska funkcija	43
8.2 Določanje prepustnosti ozračja	44
8.3 Modeliranje koncentracije CO ₂ v ozračju	44
9. ANALIZA IN DISKUSIJA	46
9.1 Toplogredna parametra A in B	46
10. UGOTOVITVE	52
11. DRUŽBENA ODGOVORNOST.....	53
11. ZAKLJUČEK.....	54
12. VIRI IN LITERATURA	55
UPORABLJENI SIMBOLI IN OZNAKE	57
PRILOGA	60

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vzroki podnebnih sprememb	12
Preglednica 2: Lastnosti toplogrednih plinov v ozračju	18
Preglednica 3: Uporabljeni podatki.....	25
Preglednica 4: Temperature po širinskih pasovih in povprečna temperatura Zemlje pri različnih vrednostih kritične temperature.....	33
Preglednica 5: Število iteracij pri različno izbranih začetnih temperaturah.	34
Preglednica 6: Temperature po pasovih in povprečna temperatura Zemlje pri različnih vrednostih albeda.....	34
Preglednica 7: Rezultati meritev.	41
Preglednica 8: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 15 km.....	47
Preglednica 9: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 30 km.....	47
Preglednica 10: Temperature po širinskih pasovih pri višini ozračja 30 km.	48

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Razlika dveh zaporednih približkov v odvisnosti od števila iteracij.	33
---	----

Graf 2: Vpliv albeda na povprečno temperaturo Zemlje.	35
Graf 3: Krivulja za napetost termočlena U' v odvisnosti od koncentracije	42
Graf 4: Prepustnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 15 km.	49
Graf 5: Prepustnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.	49
Graf 6: Temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 15 km.	50
Graf 7: Temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.	51

KAZALO SLIK

Slika 1: Dejavniki, prepletenost in spremenljivost podnebne sistema	11
Slika 2: Podnebni sistem kot skupnost atmosfere, hidrosfere, kriosfere, kopne površine in biosfere	11
Slika 3: Spekter sončne svetlobe	14
Slika 4: Absorpcijski spekter elektromagnetnega valovanja v vodi	15
Slika 5: Absorpcijski koeficient vodne pare in CO_2 v odvisnosti od valovne dolžine	15
Slika 6: Prikaz sevalnega spektra površja Zemlje pri različnih temperaturah	16
Slika 7: Ravnoesje podnebne sistema	17
Slika 8: Toplota, ki jo Zemlja absorbira in seva.	20
Slika 9: Triplastni model vesolja, ozračja in tal	21
Slika 10: Enodimenzionalni podnebni model	24
Slika 11: Globalno segrevanje ozračja pri eksponentnem naraščanju koncentracije CO_2	27
Slika 12: Pripomočki, uporabljeni pri eksperimentu.	36
Slika 13: Spekter izsevane svetlobe volframove halogene žarnice	37
Slika 14: Namestitev naprav za izvedbo poskusa.	38
Slika 15: Vertikalna namestitev naprav za izvedbo poskusa.	39
Slika 16: Merjenje prostornine zmesi s pomočjo balona.	39
Slika 17: Izpraznitev balona v absorpcijsko komoro	40
Slika 18: Napetost termočlena za čisti CO_2 , zmes1, zmes2 in zmes3 v odvisn. od časa. ...	41
Slika 19: Spreminjanje koncentracije CO_2 v ozračju in povprečne letne temperature Zemlje med leti 1880 in 2017	45
Slika 20: Trije scenariji spreminjanja koncentracije CO_2 v ozračju do konca 21. stoletja	45
Slika 21: Trije kraji v Sloveniji ob koncu 21. stoletja po najbolj pesimističnem scenariju na podlagi rezultatov podnebnih modelov evropskega projekta EURO-CORDEX	53

POVZETEK

Vse izrazitejše podnebne spremembe postajajo v zadnjih letih pomembna tema, tako v strokovni kot tudi v laični javnosti, kjer slišimo zelo nasprotujoča si stališča o vzrokih podnebnih sprememb in resnosti stanja. Stanje postaja zaskrbljujoče, saj so se vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju dvignile do ravni, ki so brez primere v najmanj zadnjih osemsto tisoč letih. Vsebnost ogljikovega dioksida v ozračju je od predindustrijske dobe narasla za več kot štirideset odstotkov.

Človekov vpliv na spreminjanje podnebja je danes znanstveno dokazano dejstvo. Večina znanstvenikov se strinja, da je povprečna temperatura na površju Zemlje v zadnjih desetletjih naraščala bolj, kot to lahko pojasnimo z naravnimi podnebnimi cikli. Globalnega segrevanja ozračja v zadnjem stoletju ni mogoče pojasniti zgolj z naravnimi vzroki-tektonskimi, astronomskimi ali s spremembo aktivnosti Sonca, ampak je skoraj zanesljivo posledica človekovega delovanja, ko z uporabo fosilnih goriv ter drugimi dejavnostmi sprošča v ozračje ogljikov dioksid in druge toplogredne pline.

Antropogeni izpusti toplogrednih plinov ne povzročajo sprememb neposredno, ampak posredno, saj spreminjajo energijsko bilanco Zemlje, zaradi česar narašča globalna ravnovesna temperatura. Zaradi naraščanja globalne temperature pa se spreminja celotni podnebni sistem. Poleg vodne pare je pomemben sevalec v infrardečem delu spektra tudi ogljikov dioksid. Količina ogljikovega dioksida, ki v naravnem ravnovesju kroži med ozračjem, tlemi, oceani in rastlinstvom, je zelo velika, človeška aktivnost pa k temu prispeva le majhen, a pomemben neuravnoteženi del.

V nalogi predpostavljamo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije ogljikovega dioksida v ozračju in povečani absorpciji infrardečega sevanja več povratnega dotoka energije, kar posledično vpliva na povišanje povprečne temperature na površju Zemlje. Za potrditev te hipoteze smo izdelali dokaj preprost podnebni model, s pomočjo katerega smo ugotavljali vpliv podnebnih dejavnikov, kot so kratkovalovno sevanje Sonca, toplotno sevanje Zemlje ter vpliv koncentracije ogljikovega dioksida na povprečno temperaturo Zemlje. Zaradi kompleksnosti reševanja iteracijske funkcije podnebnega modela smo izdelali numerični algoritem in ga uporabili v programskem paketu Scilab.

Energijski ravnovesni model smo testirali s simulacijami koncentracije ogljikovega dioksida z vrednostmi med 280 ppm in 1120 ppm (delcev na milijon) pri dveh višinah ozračja: 15 km in 30 km nad zemeljskim površjem. Pri tem smo si za izhodišče postavili cilje pariškega okoljskega dogovora iz leta 2015, kjer so se države članice OZN zavezale, da bodo omejile povprečno segrevanje ozračja na 1,5 °C v primerjavi s predindustrijsko dobo. V vseh primerih smo z numerično analizo potrdili hipotezo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije ogljikovega dioksida več atmosferskega infrardečega sevanja, zaradi česar se poviša povprečna temperatura na površju Zemlje.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju za pomoč in podporo pri raziskovanju in pisanju naloge ter vsem, ki so pripomogli k nastanku raziskovalne naloge, s pomočjo pri programiranju in pri izvedbi eksperimenta.

1. UVOD

Danes postaja problem podnebnih sprememb v medijih in javnosti čedalje bolj prisoten. Tudi stališča znanstvenikov o vzrokih sprememb, resnosti stanja in verjetnih posledicah so pogosto nasprotujoča. Človek na mnoge dejavnike, ki povzročajo podnebne spremembe, nima vpliva. Danes je znanstveno dokazano dejstvo, da so se v preteklosti pojavljale ledene dobe v veliki meri zaradi periodičnih sprememb poti kroženja Zemlje okrog Sonca in nagiba osi vrtenja Zemlje glede na ravnino kroženja. Tudi na dejavnike, ki določajo, koliko sončne energije bo Zemlja prestregla in kako se bo ta energija porazdelila po različnih geografskih širinah, človek ne more vplivati (Bergant, 2010, str.1).

Po drugi strani pa človek z izpusti različnih plinov in trdnih delcev spreminja lastnosti ozračja ter z naseljevanjem in obdelovanjem tudi lastnosti zemeljskega površja. Lastnosti ozračja in zemeljskega površja pa znatno vplivajo na to, koliko od Sonca prejete energije bo Zemlja skupaj s svojim ozračjem uspela obdržati in je porabiti za segrevanje površja, rast in razvoj rastlin, segrevanje in premikanje oceanov, zračnih mas ipd. Tako človek poleg naravnih dejavnikov v dobršni meri botruje hitrim podnebnim spremembam, ki smo jim priča v zadnjih 150 letih in se bodo predvidoma nadaljevale tudi v tem stoletju (Bergant, 2010, str.1).

Med strokovnjaki, ki preučujejo podnebne pojave, se krepi prepričanje, da se ozračje počasi segreva. Instrumentalna opazovanja v preteklih 100 letih kažejo na dvig povprečne globalne temperature zraka pri tleh za okoli 0,8 °C. Zaradi otoplitve ozračja se je ponekod dvignila gladina morske vode tudi za 20 cm, prav tako so se spremenile smeri morskih tokov. Na Antarktiki se talijo ledene ploskve in izginjajo ledeniki. Negativne posledice podnebnih sprememb lahko že občutimo tudi v Sloveniji: neurja, hudourniške poplave, pogostejši vročinski valovi, suše, edina ledenika (Zeleni sneg pod Triglavom in Skuto) se neusmiljeno krčita in niti nimata več vseh značilnosti ledenikov (Vetrnica, 2011, str. 20)

Koncentracije ogljikovega dioksida (CO₂), amonijaka, metana in še nekaterih drugih plinov se v Zemljinem ozračju zaradi človeških aktivnosti stalno povečujejo. Od predindustrijskega časa do konca 20. stoletja se je povprečna koncentracija CO₂ v vsem ozračju povečala za več kot 40%. Povečevanje koncentracije CO₂ pa ima dva glavna učinka: prepustnost ozračja se manjša (bistveno predvsem pri nizki koncentraciji) in plast z največjim izsevom dolgovalovnega sevanja ozračja je vse višje.

Čez dan se zemeljska tla segrejejo z vidno in infrardečo (IR) svetlobo, ki s sončnim sevanjem prehaja skozi ozračje. Del vpadnega sončnega sevanja se odbije od oblakov, del se ga odbije od površja Zemlje, del pa ga površje absorbira. Ker je temperatura tal in ozračja približno med 210 in 310 K, oddajata po Planckovem zakonu toploto pretežno kot IR sevanje. Del tega sevanja, ki potuje skozi ozračje, se absorbira v CO₂, hkrati pa tudi CO₂ IR seva. Nekaj tega sevanja se izgubi v vesolje, nekaj pa se ga vrne nazaj na zemeljsko površje. Zaradi tega povratnega dotoka energije se tla manj ohladijo, kot bi se, če v ozračju ne bi bilo sevajočega CO₂ (Vrhovec, 2001, str. 334).

Danes postaja znanstveno razumevanje podnebnih sprememb ključnega pomena za mnoge razvojne odločitve na različnih gospodarskih področjih. Poznavanje podnebja in podnebnih sprememb v preteklih stoletjih daje koristne informacije pri napovedovanju globalne temperature v prihodnosti. Pri tem si strokovnjaki pomagajo s podnebnimi modeli. Z zahtevnimi tridimenzionalnimi modeli so ugotovili, da bi se pri podvojitvi koncentracije CO₂ s

300 ppm¹ na 600 ppm morala povprečna temperatura na Zemlji dvigniti za 1,8 do 3,4 K. Ker na energijsko bilanco Zemlje ne vplivajo samo sevalne razmere, temveč tudi drugi dejavniki, so ti izračuni precej nenatančni (Vrhovec, 2001, str. 334).

Podnebne spremembe so znanstveno potrjeno dejstvo, ki ga, tako kot v drugih naravoslovnih znanostih, potrjujejo meritve. Globalni cirkulacijski modeli, s katerimi poskušajo danes simulirati številne dejavnike in procese, ki oblikujejo podnebje, so tridimenzionalni in veliko prezapleteni za preprosto in hitro računanje. Rešujejo jih v velikih znanstvenih središčih, kjer uporabljajo močne superračunalnike, ki za to porabijo na stotine ur (Bergant, 2010, str.3).

Na Agenciji RS za okolje ugotavljajo v okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije, da so opažene podnebne spremembe v Sloveniji celo bolj dramatične kot na globalni svetovni ravni, saj se je povprečna temperatura zraka v zadnjih petdesetih letih dvignila kar za 1,7 °C (Dolinar in ostali, 2010, str. 2). Kot izziv smo v nalogi skušali poiskati odgovor na vprašanje, ali je moč dobiti z razpoložljivim srednješolskim znanjem fizike, matematike in računalništva rezultate, ki bi predstavljali vsaj smiselne približke za vrednosti, ki jih dajejo sodobni podnebni modeli.

V nalogi je predstavljen preprost model, s pomočjo katerega lahko ugotavljamo vpliv podnebnih dejavnikov, kot so sončno sevanje, učinek spremembe koncentracije CO₂ in odbojnost tal na povprečno temperaturo Zemlje ter približni potek temperature po zemeljskih širinskih pasovih. Poudarek je na razlagi sprememb povprečne temperature na Zemlji in opisu energijskega ravnovesnega modela ter z njim povezanega učinka tople grede. Izvirno je v eksperimentalnem delu predstavljena meritev koncentracije CO₂ v majhni prostornini uporabljene absorpcijske komore. Na podlagi podnebnega modela sevalne bilance smo izdelali računalniški algoritem, ki upošteva kratkovalovno sevanje Sonca, dolgovalovno sevanje Zemlje, vpliv ozračja ter prenos toplote po zemeljskih širinskih pasovih.

1.1 Ključna dejstva in raziskovalna vprašanja

- Nesporno je, da se ozračje pri tleh segreva, kar potrjujejo meritve v svetu in tudi v Sloveniji.
- Hitrost zviševanja globalne temperature je v zadnjih sto letih izjemna v primerjavi s spremembami globalne temperature v dolgi zgodovini Zemlje.
- Ali lahko dvig globalne temperature ozračja v zadnjem stoletju pojasnimo samo z naravnimi vzroki?
- Kako pride do učinka tople grede in kakšne so njegove posledice? Kakšen je učinek tople grede v ozračju?
- Ali prejmejo tla ob povečanju koncentracije CO₂ več atmosferskega IR sevanja?
- Kako je globalno segrevanje ozračja povezano z drugimi spremembami podnebnega sistema? Ali se Zemlja na spremembe v energijski bilanci, npr. zaradi povečanja IR sevanja ozračja, odziva takoj ali z določeno časovno zakasnitvijo?

¹ 1 ppm (ppb) je en masni del primesi na milijon (milijardo) masnih delov zraka.

1.2 Hipoteze

- **H₁:** Podnevi prodrejo sončni žarki skozi ozračje in segrejejo tla. Triatomni plini v ozračju ne vplivajo na prehod vidnega dela tega sevanja, absorbirajo pa dele IR sončnega sevanja, zaradi česar se segrevajo posamezne plasti ozračja. Tla, ozračje in oblaki oddajajo po Planckovem zakonu toploto pretežno kot IR svetlobo. Prenos energije z IR sevanjem pa je odvisen od vrste in koncentracije sestavin v ozračju.
- **H₂:** Najpomembnejši sevalec v IR delu spektra in zato najpomembnejši plin tople grede je vodna para. Vendar je globalno gledano vpliv vodne pare na učinek tople grede ves čas približno enak, čeprav bi pričakovali, da se bo, zaradi povečane količine vlage v zraku, ki je posledica povečanega izhlapevanja pri višji temperature, povečalo tudi sevanje vodne pare.
- **H₃:** Pomemben sevalec v IR delu spektra je tudi triatomni CO₂. V naravnem ravnovesju je količina CO₂, ki kroži med tlemi, ozračjem in rastlinstvom, zelo velika, človeška aktivnost pa k temu prispeva le majhen neuravnoteženi del. Predpostavljamo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije CO₂ v ozračju in povečani absorpciji IR sevanja več povratnega dotoka energije, zaradi česar se poviša povprečna temperatura na površju Zemlje.

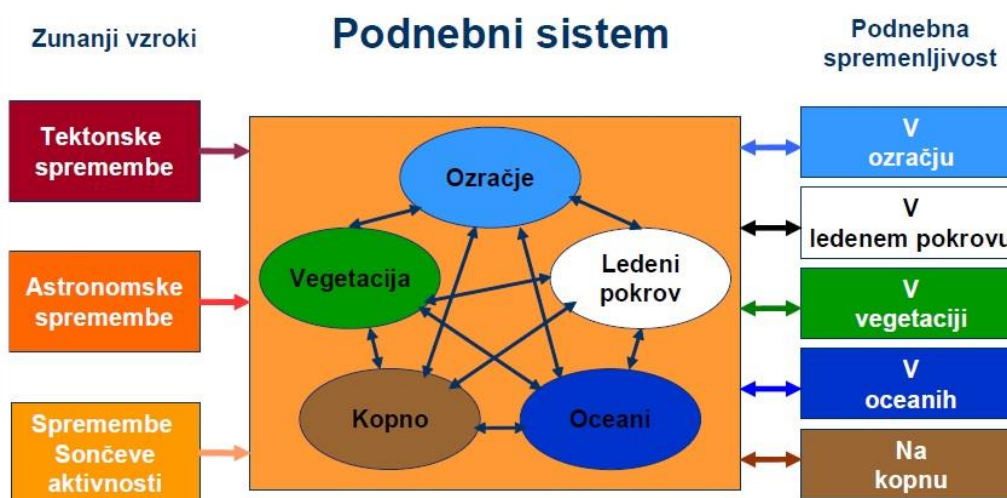
1.3 Namen naloge

- Opisati učinek tople grede in raziskati njegov učinek v ozračju.
- Raziskati dejavnike, prepletenost in spremenljivost podnebne sistema.
- Kot prvi korak k razumevanju podnebnih modelov preučiti energijski ravnovesni model toplotne bilance Zemlje.
- Linearizirati dolgovalovno sevanje Zemlje z razvojem modificirane gostote energijskega toka tal v Taylorjevo vrsto.
- Vpeljati enodimenzionalni model sevalne bilance Zemlje z razdelitvijo njenega površja na n različnih neodvisnih širinskih pasov.
- Napraviti diskretizacijo vodilne enačbe enodimenzionalnega sevalnega modela.
- Izdelati numerični algoritem za izračun poteka temperature po posameznih pasovih s programskim paketom Scilab.
- Preveriti pravilnost numeričnega algoritma pri računanju povprečne temperature na Zemlji s privzetimi vrednostmi empiričnih konstant, ki opišejo učinek tople grede.
- Pripraviti vzorce dane množine zraka s primesjo CO₂ in določiti njegovo koncentracijo.
- Določiti prepustnost ozračja in modelirati koncentracijo CO₂ v ozračju.
- Z znano prepustnostjo ozračja izračunati empirična parametra A in B , ki opišeta učinek tople grede.
- Analizirati vpliv koncentracije CO₂ na prepustnost ozračja.
- Analizirati vpliv koncentracije CO₂ na povprečno temperaturo Zemlje.
- Analizirati rezultate simulacije in jih primerjati z referenčnimi vrednostmi, ki so objavljene v strokovni literaturi.

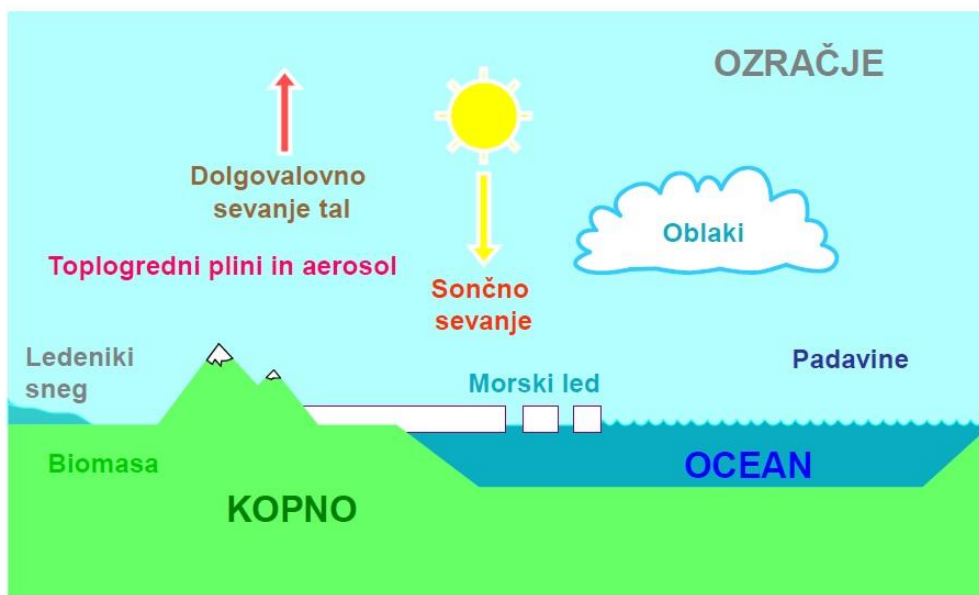
2. TEORETIČNO OZADJE

2.1 Podnebni sistem

S pojmom podnebje običajno opisujemo značilnosti vremena preko daljšega časovnega obdobja. Vremenske dogodke, ki potekajo znotraj podnebne sistema, opisujemo s fizikalnimi spremenljivkami ozračja, ki ga obravnavamo kot del podnebne sistema. Slika 1 nazorno kaže povezanost in kompleksno soodvisnost posameznih delov podnebne sistema ter zunanje vzroke, ki vplivajo na spremenljivost podnebja (Vetrnica, 2011, str. 1). Na sliki 2 je prikazan podnebni sistem še kot skupnost atmosfere, hidrosfere, kriosfere, kopne površine in biosfere ter njihovo vzajemno delovanje.



Slika 1: Dejavniki, prepletenost in spremenljivost podnebne sistema (vir: Vetrnica, 2011, str. 1)



Slika 2: Podnebni sistem kot skupnost atmosfere, hidrosfere, kriosfere, kopne površine in biosfere (vir: Kajfež-Bogataj, 2010, str. 5).

V preglednici 1 so v značilni časovni skali zbrani glavni vzroki podnebnih sprememb. Poleg naravnih dejavnikov (tektonski, astronomski, spremembe sončne aktivnosti,...), botruje človek v dobršni meri dvigu globalne temperature ozračja, ki smo ji priča v zadnjem stoletju in se bo predvidoma nadaljevala tudi v prihodnje. Z uporabo fosilnih goriv ter z drugimi dejavnostmi sprošča človek v ozračje CO₂ in druge toplogredne pline ter s tem spreminja sestavo ozračja, ki igra pomembno vlogo pri energijski oziroma sevalni bilanci zemeljskega površja. Zaradi naraščanja globalne temperature pa se spreminja celotni podnebni sistem: spreminja se pogostost in jakost izjemnih vremenskih pojavov (neurja, hudourniške poplave, pogostejši vročinski valovi, suše, itd), vse bolj se krči grenlandski ledeni pokrov in se zmanjšuje obseg arktičnega ledu, zmanjšuje se spomladanski obseg zasneženih površin na severni polobli, nivo morske gladine se vztrajno dviga (Dolinar, 2018, str. 5).

Preglednica 1: Vzroki podnebnih sprememb (vir: Dolinar, 2018, str.5).

Razlog za spremembo podnebja	Značilna časovna skala (leta)
Vpliv človeka na spremembe površja	1-100
Vpliv človeka na spremembe v ozračju	1-100
Vulkanska aktivnost	1-1000.
Spremenljivost Sončevega obsevanja	10-1.000
Interakcija ozračje-morja	1-100.000
Spreminjanje Zemljine Orbite	10.000 – 100.000
Tektonski premiki	100.000 – 100.000.000

2.2 Absorpcija elektromagnetnega valovanja, Beer-Lambertov zakon

Atomi ali molekule snovi prehajajo v višja energijska stanja tako, da absorbirajo določen delež energije elektromagnetnega valovanja, ki vpade nanje. Pri prehodu fotonov elektromagnetnega valovanja skozi snov, se njihovo število zaradi interakcij s snovjo zmanjšuje. Število fotonov, ki prispejo na cilj, je odvisno od frekvence oz. valovne dolžine, torej od energije, ki jo ima posamezni foton in razdalje, ki jo foton v snovi prepotuje.

Absorpcijski zakon (tudi Beer-Lambertov zakon) opisuje absorpcijo elektromagnetnega valovanja pri prehodu skozi raztopino ali ne povsem prozorno snov. Prepuščena gostota energijskega toka eksponentno upada, če debelina snovi narašča. V matematični obliki zapišemo absorpcijo elektromagnetnega valovanja z enačbo (Strnad, 1973, str. 639).

$$j(\lambda, x) = j_0(\lambda)e^{-\mu(\lambda, C)x}, \quad (1)$$

kjer je j_0 gostota vpadnega energijskega toka, $j(\lambda, x)$ gostota energijskega toka na mestu merjenja, x razdalja, ki jo elektromagnetno valovanje prepotuje in $\mu = \mu(\lambda, C)$ absorpcijski

koeficient snovi, ki je odvisen od valovne dolžine λ elektromagnetnega valovanja in od koncentracije C topjenca v raztopini.

Za majhne koncentracije velja, da je absorpcijski koeficient kar premo sorazmeren s koncentracijo

$$\mu(\lambda, C) = k(\lambda)C, \quad (2)$$

kjer je sorazmernostna konstanta $k(\lambda)$ odvisna le od valovne dolžine vpadnega elektromagnetnega valovanja.

Zapišimo gostoto vpadnega energijskega toka kot vsoto absorbiranega j_a in prepuščenega energijskega toka j_t in predpostavimo, da je gostota odbitega energijskega toka enaka nič

$$j_0(\lambda) = j_a(\lambda) + j_t(\lambda). \quad (3)$$

Razmerje med gostoto prepuščenega in vpadnega energijskega toka pri dani valovni dolžini imenujemo prepustnost oz. transmisivnost, razmerje med gostoto absorbiranega in vpadnega energijskega toka pa absorptivnost

$$\tau(\lambda) = \frac{j_t(\lambda)}{j_0(\lambda)}, \quad a(\lambda) = \frac{j_a(\lambda)}{j_0(\lambda)}. \quad (4)$$

Tako lahko z Beer-Lambertovim zakonom podamo gostoto prepuščenega energijskega toka skozi plast z debelino x v odvisnosti od koncentracije C absorbirajočih delcev v raztopini

$$j_t(\lambda, x) = j_0(\lambda)e^{-k(\lambda)Cx} \quad (5)$$

in po logaritmiranju

$$-\ln \frac{j_t(\lambda)}{j_0(\lambda)} = -\ln \tau = k(\lambda)Cx. \quad (6)$$

Ker ostaja absorpcijska konstanta $k(\lambda)$ v raztopini enaka, lahko z merjenjem prepustnosti τ skozi plast z debelino x določimo neznano koncentracijo delcev/molekul v raztopini.

V naravi ni teles, ki bi bila "prozorna" ($\tau = 1$) po celotnem spektru valovnih dolžin. Tako npr. voda dobro prepušča vidno svetlobo (največja prepustnost pri valovni dolžini okoli 550 nm, za katero je človeško oko tudi najbolj občutljivo), precej slabše pa toplotne valove. Podobno je zrak skoraj idealno prepusten za vidno svetlobo in neprepusten za toplotne valove v intervalu valovnih dolžin med 6 in 8 μm zaradi vsebnosti vodne pare in CO_2 (Grobljar, 2017, str. 3).

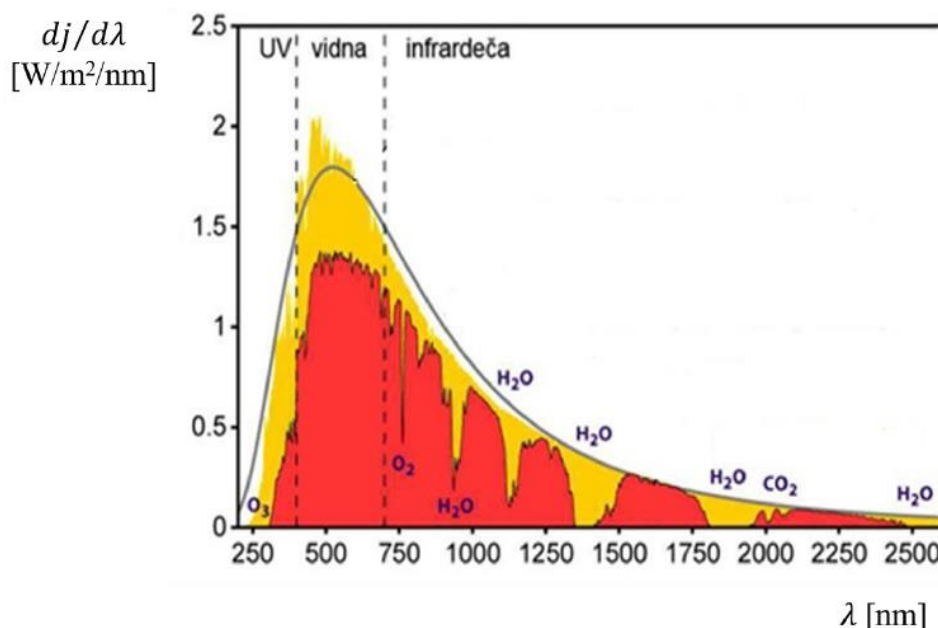
2.3 Spekter sončnega sevanja

Sonce je najpomembnejši izvor svetlobe, ki seva približno kot črno telo s temperaturo nekaj čez 6000 K. S Sonca prihaja na vrh zemeljskega ozračja svetlobni tok z gostoto v fizikalnem merilu 1370 W/m². Celotna sončna energija, ki jo prejema Zemlja, je razporejena približno takole: okrog 50% je svetlobe (0,4 do 0,8 μm), 40% toplotnih valov (0,8 do 4,0 μm), preostalih 10% so ultravijolični žarki (0,1 do 0,4 μm). Kot zanimivost omenimo, da 99% spektra elektromagnetnega valovanja, ki ga izseva Sonce, zajema valovne dolžine od 0,25 do 3 μm .

Spekter sončne svetlobe se zaradi absorpcije in sipanja na različnih delcih (prah, vodne kapljice, molekule različnih plinov) v zemeljskem ozračju precej spremeni. Zaradi absorpcije v ozračju

je gostota sončnega svetlobnega toka na površju Zemlje manjša, kar pomeni, da spekter sončnega sevanja pri tleh ni več enak kot na vrhu ozračja. Ob jasnem vremenu meri gostota energijskega toka na morski gladini okoli 1000 W/m^2 , ob oblačnem precej manj.

Na sliki 3 je prikazan spekter sončne svetlobe, kjer na vodoravno os nanašamo valovno dolžino λ , na navpično os pa količino $dj/d\lambda$, ki predstavlja gostoto energijskega toka na enoto valovne dolžine pri valovni dolžini λ . Črna krivulja ponazarja spekter sevanja črnega telesa pri 5700 K, rumena barva predstavlja spektralno gostoto na vrhu ozračja, rdeča pa spektralno gostoto ob jasnem dnevu na morski gladini.



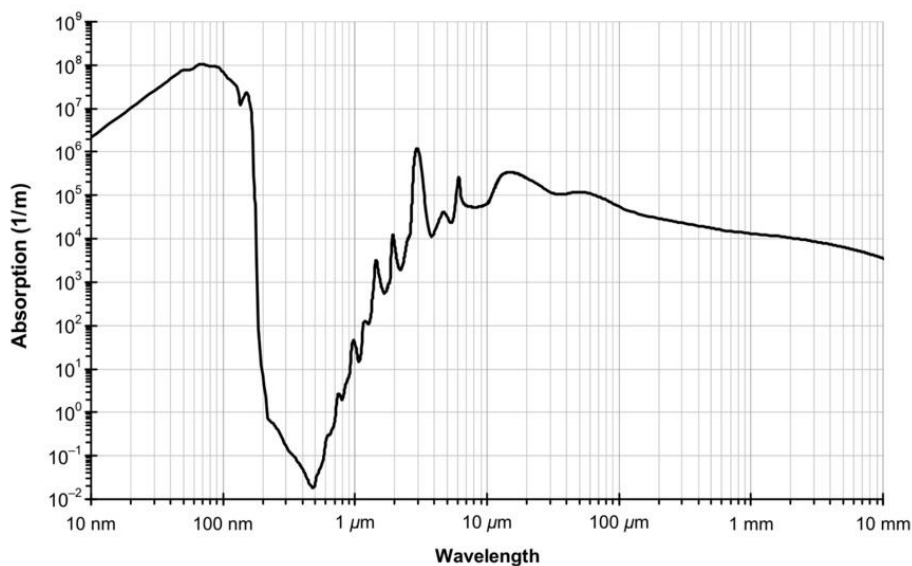
Slika 3: Spekter sončne svetlobe (vir: Šterman, 2013, str. 6).

2.4 Absorpcija toplogrednih plinov v ozračju

Večina plinov, ki sestavljajo zemeljsko ozračje absorbira toplotne valove, pri čemer molekule absorbirajo energijo z izbranimi valovnimi dolžinami in s tem določajo prepustnost ozračja. Na prehod elektromagnetnega valovanja skozi ozračje najbolj vpliva vodna para v oblakih, ki se v IR delu spektra obnašajo praktično kot črna telesa (skoraj vso vpadlo IR svetlobo absorbirajo). Pri absorpciji elektromagnetnega valovanja preidejo molekule vode v vzbujena stanja, ki so lahko elektronska, vibracijska ali rotacijska (Grobljar, 2017, str. 3).

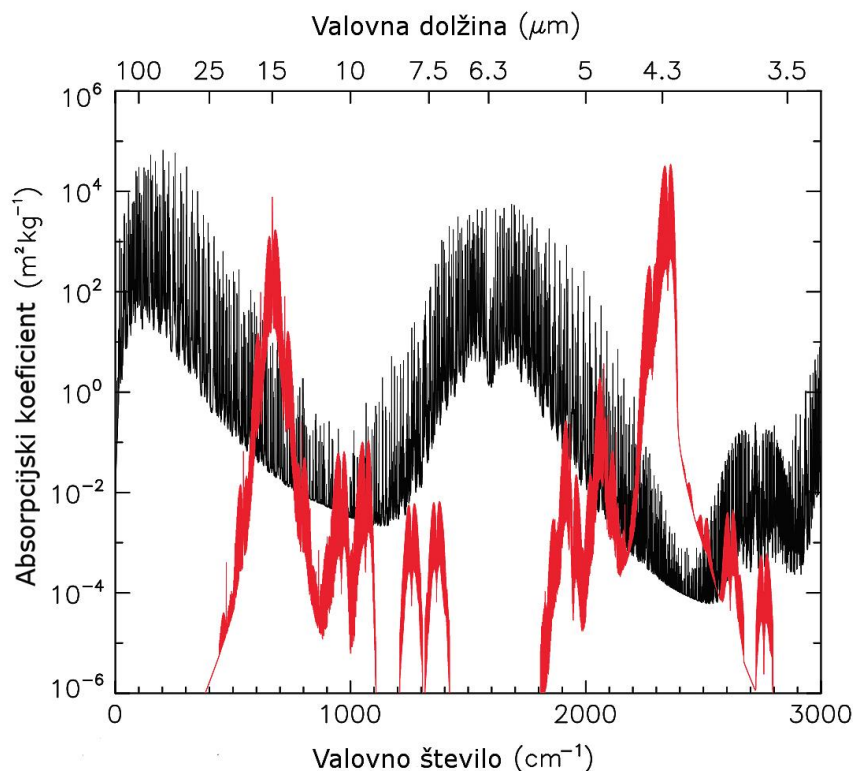
V ozračju je prenos energije z IR sevanjem bistveno odvisen od koncentracije vodne pare in CO_2 . V IR delu spektra je vodna para najpomembnejši absorber in sevalec, saj prispeva okoli 70% vsega IR sevanja, ki pride iz ozračja. Absorpcija in emisija sta izraziti na ozkih intervalih valovnih dolžin, z značilnim potekom, kot je prikazan na sliki 4. Vodna para ima izrazite absorpcijske vrhove okoli valovnih dolžin $1,38 \mu\text{m}$, $1,87 \mu\text{m}$, $2,73 \mu\text{m}$ in $6,27 \mu\text{m}$.

Pomemben sevalec je v IR delu spektra tudi triatomni CO_2 , ki je v zraku dobro pomešan z dvoatomnima kisikom in dušikom, ki prepuščata IR sevanje. Količina CO_2 je v ozračju dokaj stalna, medtem ko je bistveno bolj spremenljiva količina vodne pare. Vlažni deli ozračja, še posebej oblaki, v katerih je vodna para nasičena, so v IR delu spektra skoraj črni, jasno in suho ozračje pa del IR sevanja prepušča.



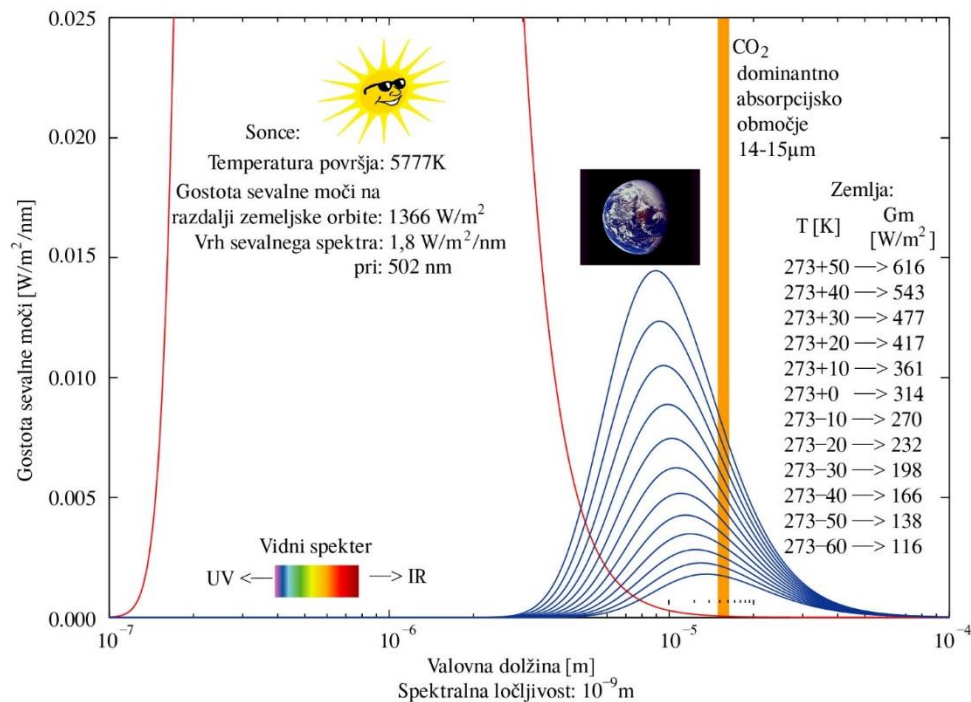
Slika 4: Absorpcijski spekter elektromagnetnega valovanja v vodi (vir: Grobljar, 2017, str. 9).

Na sliki 5 je primerjalno prikazan absorpcijski koeficient vodne pare in CO_2 v odvisnosti od valovne dolžine. Pojavljanje velikega števila resonančnih frekvenc z različnimi verjetnostmi za vzbujanje zagotovo pomeni zapleteno odvisnost prepustnosti ozračja od valovne dolžine svetlobe. Prekrivanje absorpcijskega spektra vodne pare z absorpcijskimi pasovi glavnih antropogenih toplogrednih plinov, CO_2 , metana in didušikovega oksida povzroči, da lahko absorbira vodna para znatni del elektromagnetnega sevanja na njihov račun in s tem zmanjša njihov sevalni prispevek.



Slika 5: Absorpcijski koeficient vodne pare (črna) in CO_2 (rdeča) v odvisnosti od valovne dolžine (vir: Vlahović, 2018, str. 3).

Napravimo še nekaj preproste statistike in z njo nakažimo zelo zapletene procese, ki potekajo pri absorpciji toplogrednih plinov. Pri tem se osredotočimo na absorpcijske lastnosti CO_2 v ozračju. Pomagajmo si s sliko 6, ki prikazuje sevalni spekter zemeljskega površja pri različnih temperaturah. Na sliki opazimo, da se maksimum sevalnega spektra zemeljskega površja, ki je določen z Wienovim zakonom, z naraščanjem temperature oddaljuje od absorpcijskega spektra CO_2 , ki je praktično neodvisen od temperature ozračja. Zaradi tega CO_2 ne absorbira sevanja sorazmerno s temperaturo površja, kar pomeni, da toplejše površine Zemlje sevajo manj v dominantnem absorpcijskem območju CO_2 (oranžna površina na sliki 6), ki leži med približno 14–15 μm valovne dolžine (Margan, 2019, str.1).



Slika 6: Prikaz sevalnega spektra površja Zemlje pri različnih temperaturah (vir: Margan, 2019, str.1).

Pri določeni gostoti fotonov IR sevanja Zemlje je pri absorpciji pomembna tudi gostota molekul CO_2 v ozračju, ki z neko verjetnostjo zajamejo foton. Če predpostavimo, da bi bilo ozračje sestavljeno samo iz molekul CO_2 , potem bi pri nizkih temperaturah zemeljskega površja znašala absorpcija okoli 6–7% celotnega sevalnega spektra, pri višjih pa le okoli 3–4%, kot povzamemo iz strokovne literature (Margan, 2019, str.1). Če upoštevamo, da je delež CO_2 v ozračju le nekaj stotink odstotka, potem razumemo, zakaj se precejšen delež fotonov IR sevanja izgubi v velike višine, predno jih absorbira kakšna molekula CO_2 . Zato se nižje plasti ozračja zaradi absorpcije fotonov v molekulah CO_2 le malenkostno segrejejo.

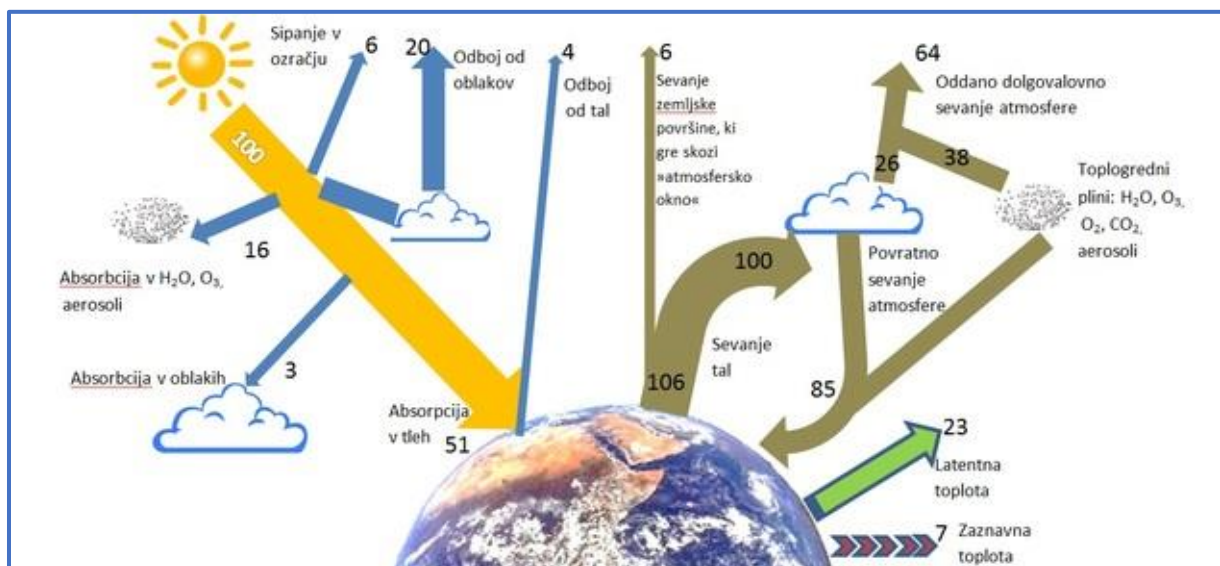
Povrhu vsega pa mora molekula CO_2 , ki je absorbirala foton, spotoma trčiti v eno od sosednjih molekul zraka in ji oddati del prejete energije, če naj se toplota s prevajanjem prenese na pline, ki v tem delu spektra nimajo značilnih resonanc. Po trku ostane molekuli CO_2 manj energije in tudi ko ponovno odda foton, bo ta imel premajhno energijo, da bo ga katera od drugih molekul CO_2 lahko resonančno absorbirala. Lahko pa se seveda zgodi, da molekula CO_2 emitira foton pred trkom s kakšno drugo molekulo, tako da bo imel oddani foton enako energijo kot absorbirani. Verjetnost, da bo oddani foton usmerjen k površju je 0,5 in še tega lahko na tej poti prestreže kaka druga molekula CO_2 . In potem se zgodba ponovi z verjetnostjo le 0,5, da bo oddani foton usmerjen k površju Zemlje...

2.5 Učinek tople grede

Čez dan se zemeljska tla segrejejo z vidno in IR svetlobo, ki s sončnim sevanjem prehaja skozi ozračje. Del vpadnega sončnega sevanja se odbije od oblakov, del se ga odbije od površja Zemlje, del pa ga površje absorbira. Ker je temperatura tal in ozračja približno med 210 in 310 K, oddajata po Planckovem zakonu toploto pretežno kot IR sevanje. Površje trdne Zemlje, zasnežene in ledene površine ter vodne površine smemo v IR delu spektra obravnavati kot skoraj črna telesa. Slika 7 prikazuje ravnovesje podnebnega sistema z vsemi energijskimi pretoki v ozračju. Za ilustracijo so ob posameznih energijskih tokovih pripisani še odstotki, ki kažejo delež glede na energijo, ki pride v ozračje.

Segreto zemeljsko površje seva nazaj v ozračje IR svetlobo (396 W/m^2) pri daljših valovnih dolžinah, za katere pa je ozračje manj prepustno. Del tega sevanja namreč toplogredni plini v ozračju absorbirajo in nato ponovno izsevajo na vse strani, tudi nazaj proti zemeljskemu površju. Tako ostane del energije, ki bi se sicer izgubil v vesolje, ujet v spodnjem delu ozračja, ki ima zaradi tega povratnega sevanja ob površju povprečno temperaturo za nekaj deset stopinj višjo, kot bi bila brez učinka tople grede. Ozračje ima tako podobno vlogo kot stene tople grede, ki prepuščajo sončno sevanje, zadržijo pa toploto površja, ki bi se sicer izgubila v okolico. Tako je znotraj tople grede višja temperatura kot v okolici (Vetrnica, 2011, str. 6).

Oglejmo si še, kakšen je vpliv sevanja vodne pare in CO_2 , ki sta v danih koncentracijah prisotna v ozračju. V jasni noči s suhim zrakom oddajajo tla sevanje v IR delu spektra. Del tega sevanja, ki potuje skozi ozračje, se absorbira v CO_2 , hkrati pa tudi CO_2 IR seva. Nekaj tega sevanja se izgubi v vesolje, nekaj pa se ga vrne nazaj na zemeljsko površje. Zaradi tega povratnega dotoka energije se tla manj ohladijo, kot bi se, če v ozračju ne bi bilo sevajočega CO_2 . Kljub vsemu pa se lahko v jasnih hladnih nočeh Zemlja dovolj ohladi, da se zrak prenasiti z vlago: nastane rosa ali slana.



Slika 7: Ravnovesje podnebnega sistema (vir: Dolinar, 2018, str. 7).

Če je v ozračju prisotna tudi vodna para, predvsem v oblakih, potem je količina izsevane energije, ki jo prestrežejo tla bistveno večja, kot v jasni noči, saj prispeva vodna para kar dvakrat več IR sevanja kot CO_2 . V oblačnih nočeh se zrak pri tleh bistveno manj ohladi, zato oblačne

noči tudi niso pretirano hladne. Seveda je povratno sevanje iz ozračja prisotno tudi podnevi, le da je tedaj vpliv sončnega sevanje bistveno močnejši (Vrhovec, 2001, str. 333).

Glavni toplogredni plini v ozračju, ki so prikazani v preglednici 2, del IR sevanja Zemlje absorbirajo in nato, prav tako v IR delu spektra, sevajo na vse strani. Poleg koncentracije v ozračju sta pri oceni njihovega učinka pomembni še dve lastnosti: toplogredni potencial (tudi jakost toplogrednega učinka) in življenjska doba posameznega plina v ozračju. Kot je razvidno iz preglednice so pri absorpciji IR sevanja nekateri plini bolj učinkoviti, torej imajo večji toplogredni potencial, ker absorbirajo pri različnih valovnih dolžinah, energija IR sevanja pa je pri različnih valovnih dolžinah seveda različna. Toplogredni potencial metana je sicer 23-krat večji kot pri CO₂, vendar pa ima metan v ozračju precej krajšo življenjsko dobo (približno 12 let) v primerjavi s CO₂, ki ostane v ozračju od 50 do 200 let, odvisno ali se absorbira na kopnem ali v oceanih. Tako je pričakovati, da bodo, glede na dolgo življenjsko dobo v ozračju, dosedANJI izpusti CO₂ učinkovali na naše podnebje še najmanj stoletje (Vetrnica, 2011, str. 24).

Preglednica 2: Lastnosti toplogrednih plinov v ozračju (vir: Vetrnica, 2011, str. 24).

Toplogredni plin	Kemijska formula	Antropogeni vir	Življenjska doba v ozračju (leta)	Toplogredni potencial	Koncentracija pred industrijsko dobo	Trenutna koncentracija
vodna para	H ₂ O				0–4 %	nekaj % več
ogljikov dioksid	CO ₂	fosilna goriva, sprememba rabe tal, proizvodnja cementa	50–200	1	270 ppm	380 ppm ¹
metan	CH ₄	fosilna goriva, neoluščen riž, deponije odpadkov	12	23	700 ppb	1700 ppb ²
didušikov oksid	N ₂ O	gnojila, industrija, sežiganje	114	296	275 ppb	315 ppb
CFC-12	CCl ₂ F ₂	tekoča hladilna sredstva, pene	100	10.600	0	0,54 ppb
HCFC-22	CHClF ₂	hladilniki	11,9	1700	?	?
perfluoroetan	C ₂ F ₆	pridelava aluminija, izdelava polprevodnikov	10.000	11.900	?	?
žveplov heksafluorid	SF ₆	izolacijske tekočine	3200	22.200	?	?

3. PODNEBNI MODELI

Podnebni modeli so računalniški programi, ki simulirajo ključne procese podnebne dogajanja na Zemlji. Modeli temeljijo na uporabi osnovnih fizikalnih zakonitosti, zapisanih v obliki matematičnih enačb, ki jih s primerno numerično metodo rešujemo z računalnikom. Cilj modeliranja je kar se da natančno predstaviti podnebne razmere in ugotoviti vplive različnih dejavnikov na njih.

Ob novih spoznanjih in zakonitostih obnašanja narave so se podnebni modeli s časom razvijali in izpopolnjevali. Tako je klimatologija zadnjih nekaj desetletij izjemno napredovala in nadgradila osnovno fizikalno sliko spreminjanja podnebja. Še zlasti skokovit napredek je bil dosežen v zadnjih dvajsetih letih, delno zaradi boljših paleoklimatskih podatkov in bolj kakovostnih satelitskih podatkov, kot tudi zaradi zmogljivejših računalnikov z dovolj spominske kapacitete.

Zemeljski podnebni sistem je zelo zapleten in nelinearen, zato morajo sodobni podnebni modeli v izračunih upoštevati vse več procesov, ki podnebni sistem določajo. Obstajajo štiri osnovni tipi podnebnih modelov (Žagar in ostali, 2011, str. 73):

- Modeli energijskih bilanc so enodimenzionalni in uporabljajo močno poenostavljene zveze za izračun globalne temperature v posameznem širinskem pasu.
- Enodimenzionalni sevalno-konvektivni modeli računajo vertikalni profil temperature z modeliranjem sevalnih procesov in konvektivnim prilagajanjem privzetega temperaturnega profila.
- Dvodimenzionalni statistično-dinamični modeli vključujejo kemizem in obravnavajo procese na zemeljskem površju ter dinamiko ozračja v okviru povprečenih pasov.
- Globalni cirkulacijski modeli vključujejo tridimenzionalnost ozračja in/ali oceanov. Skušajo zajeti vse najpomembnejše podnebne procese.

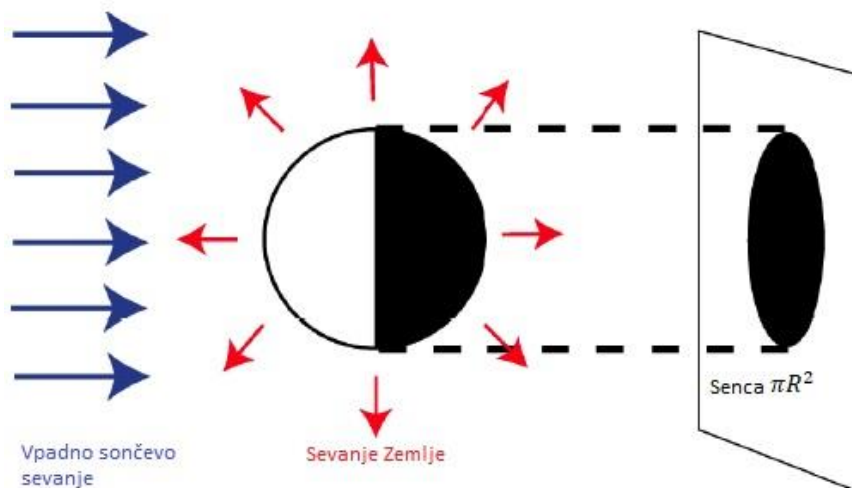
Čeprav uporabljajo zahtevnejši modeli zelo podobne kvantitativne metode za simulacijo interakcij med pomembnimi podnebnimi dejavniki, pa vseeno prihaja med njihovimi rezultati do opaznih razlik. Rezultati vseh pa nesporno kažejo, da narašča globalna temperatura zaradi naraščanja koncentracij toplogrednih plinov v ozračju. Modeli tudi potrjujejo, da so na dvig temperature v zadnjih sto letih prvenstveno vplivali izpusti toplogrednih plinov, precej manj pa nekoliko povečana aktivnost Sonca.

V okviru mednarodne organizacije IPCC² so opravili izračune za predvideno povprečno temperaturo na Zemlji v naslednjih sto letih. Ugotovili so, da se bo ob napovedanem povečanju koncentracije toplogrednih plinov povprečna temperatura na Zemlji dvignila za okoli 1,4 do 4,5 K. Vidimo, da tudi izračuni z najboljšimi računalniki vsebujejo določeno negotovost, kar razložimo z dejstvom, da je obravnavani sistem izredno kompleksen in da lahko tudi majhne spremembe v parametrih povzročijo velike učinke, ki jih lahko vodna para v ozračju še dodatno ojači.

² Organizacija IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) je bila ustanovljena v okviru OZN.

3.1 Energijski ravnovesni model

Z ravnovesnim modelom (tudi 0-dimenzionalni model) zapišemo energijsko bilanco Zemlje kot planeta najprej tako, da obravnavamo tla, oceane in ozračje kot eno samo telo. V tem primeru sta pomembna dva energijska tokova: obsevanje Sonca in sevanje Zemlje, kot je ilustrirano na sliki 8. Predpostavimo, da je toplotni tok, ki prihaja iz notranjosti Zemlje proti površju mnogo manjši od sevalnih tokov in ga smemo zanemariti.



Slika 8: Toplota, ki jo Zemlja absorbira in seva.

Sonce obseva polovico zemeljske oble, pri čemer je razporeditev absorbirane moči po površini osvetljene polovice odvisna od albeda³ a in od kota med smerjo sončnih žarkov in normalo na površje. Zemlja, ki oddaja toplotne valove iz vse površine, seva skoraj kot črno telo, kar pomeni, da ima v IR delu spektra emisivnost⁴ $\varepsilon \approx 1$.

Stanje obravnavamo kot ustaljeno, če vzamemo dovolj dolg časovni interval. Za Zemljo kot celoto torej velja, da se vpadna energija Sonca izenači z energijo, ki jo Zemlja izseva v vesolje

$$(1 - a)j_0 \cdot \pi R^2 = \sigma T^4 \cdot 4 \pi R^2, \quad (7)$$

kjer je $R = 6,371 \cdot 10^6$ m polmer Zemlje, j_0 gostota svetlobnega toka, ki s Sonca vpade na vrh zemeljskega ozračja (solarna konstanta), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ Stefan-Boltzmannova konstanta in a povprečni albedo Zemlje. Od tod izračunamo povprečno globalno efektivno temperaturo Zemlje

$$T_e = \left(\frac{(1 - a)j_0}{4\sigma} \right)^{1/4}. \quad (8)$$

Planetarni albedo je močno odvisen od narave površja, razporeditve vegetacije, snežne odeje ipd. Če vzamemo, da je albedo Zemlje $a = 0,3$ in $j_0 = 1370 \text{ W/m}^2$, dobimo za povprečno efektivno temperaturo Zemlje $T_e = 255 \text{ K}$ (-18°C), kar približno ustreza temperaturi v zgornji tretjini troposfere (Vrhovec, 2001, str. 335).

³ Albedo (odbojnost) je lastnost površine telesa, ki nam pove, kolikšen del svetlobnega toka se na površini odbije.

⁴ Tudi emisivnost je lastnost površine telesa in nam pove, kolikšno je pri posamezni valovni dolžini razmerje med sevanjem sivga in črnega telesa enakih površin. Večina teles je sivih, kar pomeni, da telo del sevanja odbije.

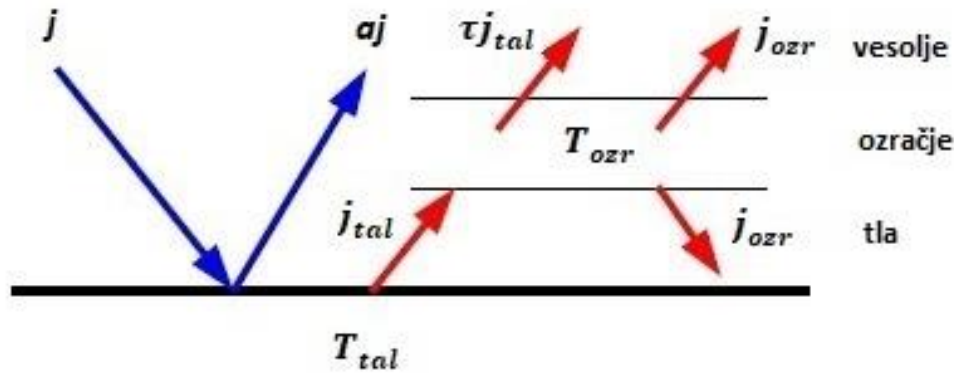
Dejanska temperatura na površju Zemlje je višja zaradi učinkov toplogrednih plinov. Vpliv učinka tople grede v ozračju na temperaturo na Zemlji ocenimo s pomočjo triplastnega modela, kjer poleg tal in vesolja upoštevamo še ozračje. V modelu predpostavimo, da ozračje v celoti prepušča sončno sevanje. Tla absorbirajo del sončnega sevanja, prejmejo polovico sevanja ozračja in tudi sama sevajo. Kot je ilustrirano na sliki 9 pa ozračje delno absorbira in emitira IR sevanje, ki izhaja iz tal. Ravnovesje gostot energijskih tokov na meji med ozračjem in tlemi opišemo z enačbo

$$(1 - a)j = j_{tal} - j_{ozr} \quad (9)$$

kjer smo sevanje ozračja označili z j_{ozr} in sevanje tal z j_{tal} . V gostoti energijskega toka $j = j_0/4$ upoštevamo, da Sonce obseva Zemljo le z ene strani, sama pa seva po celotni površini. Ozračje absorbira del IR sevanja tal in ga v enakih delih izseva navzgor in navzdol

$$(1 - \tau)j_{tal} = 2j_{ozr}, \quad (10)$$

kjer smo s τ označili prepustnost ozračja. V vesolje torej seva ozračje, deloma pa pride v vesolje tudi sevanje s tal.



Slika 9: Triplastni model vesolja, ozračja in tal (vir: Schmittner, 2013, str. 7).

Ko vstavimo enačbo (10) v (9) dobimo

$$(1 - a)j = \frac{(1 + \tau)}{2} j_{tal} \equiv g j_{tal} \equiv J_{tal}, \quad (11)$$

kjer smo z $g = (1 + \tau)/2$ pisali toplogredni faktor, ki je odvisen od prepustnosti ozračja. Sklicujmo se na vir (Schmittner, 2013, str. 7) in izberimo povprečno prepustnost zemeljskega ozračja $\tau = 0,23$, kar pomeni $g = 0,615$. Z upoštevanjem Stefanovega zakona za črno telo (tla) dobimo iz enačbe (11)

$$T_{tal} = \left(\frac{(1 - a)j_0}{4\sigma g} \right)^{1/4} = 287,9 \text{ K} = 14,8 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (12)$$

kar veliko boljše ustreza dejanskim razmeram na Zemlji pri tleh kot rezultat prejšnjega izračuna. Po enačbi (10) izračunamo še temperaturo ozračja $T_{ozr} = 227 \text{ K} = -46 \text{ } ^\circ\text{C}$, kar je blizu satelitsko izmerjeni temperaturi tropopavze na meji med troposfero in stratosfero.

Z izračunano temperaturo tal (12) ocenimo gostoto energijskega toka IR sevanja, ki ga oddaja Zemlja $j_{tal} = \sigma T_{tal}^4 \approx 390 \text{ W/m}^2$, kar se presenetljivo dobro ujema z vrednostjo, ki jo

preberemo s slike 7. Izračunajmo še celotno gostoto energijskega toka na vrhu ozračja $\tau j_{tal} + j_{ozr} = \sigma(\tau T_{tal}^4 + T_{ozr}^4) \approx 240 \text{ W/m}^2$, kar je zadovoljiv približek za vrednost, ki jo navaja slika 7. Poudariti pa je treba, da smo v poenostavljenem modelu zanemarili kar nekaj prispevkov, kot npr. latentno toploto (energija, potrebna za evaporacijo tal) in zaznavno toploto (izmenjava toplote s turbulenco oz. konvekcijo), absorpcijo sončnega sevanja v ozračju itd.

Iz enačbe 10 še izrazimo razmerje gostot energijskih tokov tal in ozračja $j_{tal}/j_{ozr} = 2/(1 - \tau)$ in od tod razmerje ustreznih temperatur

$$\frac{T_{tal}}{T_{ozr}} = \left(\frac{2}{1 - \tau} \right)^{1/4}. \quad (13)$$

Iz enačbe (13) razberemo, da je pri vseh vrednostih prepustnosti temperatura ozračja nižja od temperature tal. V limiti, ko gre $\tau \rightarrow 1$, postane temperatura ozračja $T_{ozr} = 0$.

3.2 Linearizacija dolgovalovnega sevanja Zemlje

Linearizirajmo dolgovalovno sevanje Zemlje, tako da modificirano gostoto energijskega toka tal J_{tal} razvijemo okoli temperature T_0 v Taylorjevo vrsto

$$J_{tal}(T - T_0) = g\sigma T_0^4 + \left. \frac{\partial J_{tal}}{\partial T} \right|_{T_0} (T - T_0) + \dots, \quad (14)$$

iz česar sledi po kratki preureditvi

$$J_{tal}(T - T_0) = A + BT. \quad (15)$$

Z $A = -3g\sigma T_0^4$ in $B = 4g\sigma T_0^3$ smo označili empirična parametra, ki opišeta učinek tople grede in sta odvisna od temperature T_0 ter prepustnosti ozračja. Ko vstavimo za T_0 npr. temperaturo tal (288 K) dobimo $A = -726 \text{ W/m}^2$ in $B = 3,36 \text{ W/m}^2\text{K}$. Če podajamo temperaturo v °C, potem znaša parameter $A = 191,3 \text{ W/m}^2$.

Na spremembe v energijski bilanci, npr. zaradi povečanja IR sevanja ozračja, se Zemlja odziva s časovnim zaostankom zaradi ogromne toplotne kapacitete trdnih tal in oceanov. Skušajmo si najprej pomagati s preprosto fizikalno oceno. Če privzamemo, da je toplotna kapaciteta ozračja 1 enota (vse ozračje nad enim kvadratnim metrom zemeljske površine tehta približno 10 000 kg, specifična toplota pri konstantnem tlaku je okoli 1 000 J/kg K), je toplotna kapaciteta prvih 10 (globinskih) metrov trdnih tal okoli 2,4 enote (gostota tal je okoli 4000 kg/m³, specifična toplota pa okoli 2000 J/kg K, trdna tla pokrivajo 30% Zemlje) in toplotna kapaciteta prvih 50 (globinskih) metrov oceana približno 15 enot⁵ (voda se lahko meša in zato se segrevajo in ohlajajo debelejšje plasti; gostota je 1 000 kg/m³, specifična toplota 4200 J/kg K, ocean pokriva 70% Zemlje). Tako ocenimo, da je za segrevanje tal in oceana potrebno dosti več toplote kot za segrevanje vsega ozračja (Vrhovec, 2001, str. 338).

Izračunajmo še časovno konstanto Zemlje glede na spremembe v energijski bilanci. Predpostavimo, da je ravnovesna temperatura Zemlje T_0 npr. 288 K. Zaradi neke dovolj majhne

⁵ Pri izračunu razmerja toplotnih kapacitet za celotno Zemljo smo upoštevali, da se segreva ali ohlaja le zgornja plast morske vode, v resnici pa se v nekaj stoletnem časovnem intervalu postopoma segreva tudi globoka oceanska voda.

zunanje motnje (perturbacije) naj se temperatura poveča na $T(t) = T_0 + T'(t)$, zaradi česar se poveča delež dolgovalovnega sevanja. Zaradi oddanega toplotnega toka se manjša temperatura Zemlje. Uporabimo energijski izrek termodinamike in upoštevajmo, da je oddani toplotni tok razlika med kratkovalovnim sončevim sevanjem $(1 - a)j$ in dolgovalovnim sevanjem Zemlje $A + BT$

$$C^* \frac{dT'}{dt} = S[(1 - a(T_0 + T'))j - A - B(T_0 + T')] , \quad (16)$$

kjer smo s C^* pisali skupno toplotno kapaciteto Zemlje in z S njeno površino. Predpostavimo, da je motnja dovolj majhna $T' \ll T_0$ in da je $a(T_0 + T') \approx a(T_0) = a_0$, pa se enačba (16) poenostavi

$$C^* \frac{dT'}{dt} = S[(1 - a_0)j - A - B(T_0 + T')] \quad (17)$$

in zaradi (11) dokončno v

$$C^* \frac{dT'}{dt} = -SBT' . \quad (18)$$

Spremenljivki ločimo in dobimo preprosto diferencialno enačbo

$$\frac{dT'}{T'} = -\frac{SBdt}{C^*} , \quad (19)$$

ki da, integrirana od $T'(t = 0)$ do T' in od 0 do t

$$T'(t) = T'(t = 0)e^{-\frac{SB}{C^*}t} , \quad (20)$$

kar pomeni, da temperatura zaradi motnje eksponentno pojema s časovno konstanto C^*/SB . Če želimo določiti časovno konstanto, zapišimo celotno toplotno kapaciteto C^* kot vsoto deležev ozračja, trdne Zemlje in oceanov

$$C^* = C_{ozr}^* + C_{tal}^* + C_{oce}^* . \quad (21)$$

Upoštevajmo, da je toplotna kapaciteta telesa enaka produktu njegove mase in specifične toplote pri konstantnem tlaku, pa lahko zapišemo posamezne prispevke

$$\begin{aligned} C_{ozr}^* &= c_{pozr} \rho_{ozr} S h_{ozr} = 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 8\,300 \text{ m} \cdot S \approx 10 \cdot 10^6 \cdot S \frac{\text{J}}{\text{Km}^2} , \\ C_{tal}^* &= c_{ptal} \rho_{tal} S h_{tal} = 2\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 4\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \text{ m} \cdot 0,3 S = 24 \cdot 10^6 \cdot S \frac{\text{J}}{\text{Km}^2} , \\ C_{oce}^* &= c_{poce} \rho_{oce} S h_{oce} = 4\,200 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 50 \text{ m} \cdot 0,7 S = 147 \cdot 10^6 \cdot S \frac{\text{J}}{\text{Km}^2} . \end{aligned} \quad (22)$$

Časovno konstanto lahko potem izračunamo kot

$$\frac{C^*}{SB} = \frac{(C_{ozr}^* + C_{tal}^* + C_{oce}^*)}{SB} \approx 5,4 \cdot 10^7 \text{ s} , \quad (23)$$

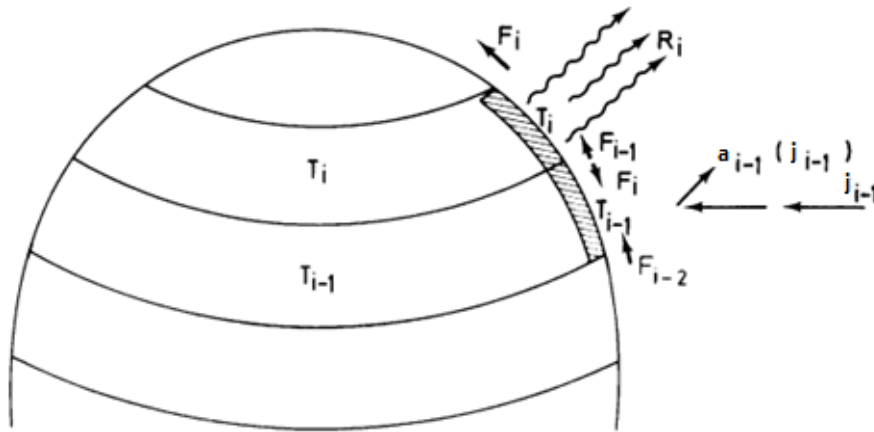
kar pomeni približno 1,7 leta. Če bi se torej zaradi zunanje motnje povečala ravnovesna temperatura Zemlje za 1 stopinjo, bi se temperatura med ohlajanjem znižala za pol stopinje v približno $t_{1/2} = C^*/SB \cdot \ln 2 = 1,2$ leta.

3.3 Enodimenzionalni model sevalne bilance

V enodimenzionalnem modelu obravnavamo n različnih neodvisnih širinskih pasov, kot je prikazano na sliki 10. Za i -ti širinski pas uporabimo in dopolnimo enačbo (11)

$$(1 - a(T_i))j_i = R(T_i) + F(T_i) = A + BT_i + F_i, \quad (24)$$

kjer smo s T_i označili površinsko temperaturo tal v i -tem širinskem pasu in z $R(T_i) = R_i = A + BT_i$ dolgovalovno sevanje, ki zapušča vrh širinskega pasu. Empirični parameter R_i je premo sorazmeren s T_i^4 , vendar lahko odvisnost v temperaturnem intervalu med 250 in 300 K aproksimiramo z linearno zvezo, kot smo pokazali v prejšnjem podpoglavju.



Slika 10: Enodimenzionalni podnebni model.

Novi člen $F(T_i) = F_i$ opisuje izgubo energije iz danega pasu v sosednji hladnejši širinski pas. Pri opisu prenosa energije med sosednjima pasovoma upoštevamo empirično konstanto K , ki predstavlja transportni koeficient

$$F(T_i) = K(T_i - \bar{T}), \quad (25)$$

kjer predstavlja $\bar{T}$ povprečno globalno temperaturo Zemlje. Različni avtorji predlagajo različne vrednosti za transportni koeficient: npr. K. Budyko $K = 3,18 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Budyko, 1969, str. 613). Gostoto energijskega toka vpadnega sončnega sevanja v i -tem širinskem pasu podamo z naslednjim izrazom (McGuffie, 2005, str. 85)

$$j_i = \frac{j_0}{4} f(\varphi_i), \quad (26)$$

kjer funkcija $f(\varphi_i) = f_i$ opisuje porazdelitev vpadnega sevanja Sonca po geografski širini danega pasu φ_i . Gre za popravljeno obliko kosinusne porazdelitve, ki upošteva še nagib zemeljske osi. Vrednosti f_i so npr. na ekvatorju 1,219, blizu pola pa 0,5.

Ko izraza (25) in (26) vstavimo v enačbo (24) ter jo preuredimo, lahko izrazimo temperaturo i -tega širinskega pasu

$$T_i = \frac{1}{B + K} \left[\frac{j_0}{4} (1 - a_i) f_i - A + K \bar{T} \right]. \quad (27)$$

Na podlagi izračunanih temperatur po pasovih izračunamo povprečno temperaturo na Zemlji z naslednjim izrazom (McGuffie, 2005, str. 86)

$$\bar{T} = \frac{\sum_i T_i \cos \varphi_i}{\sum_i \cos \varphi_i}. \quad (28)$$

3.4 Diskretizacija vodilne enačbe enodimenzionalnega modela

Vsi členi enačbe (27) so funkcije temperature T_i , vključno z albedom $a(T_i) = a_i$, ki se občutno poveča pri dovolj nizkih temperaturah, ko pride do nastanka snega ali ledu. Albedo opišemo z naslednjo stopničasto funkcijo

$$a_i = \begin{cases} 0,3 & T_i > T_{kr} \\ 0,6 & T_i < T_{kr} \end{cases}, \quad (29)$$

kjer je T_{kr} temperatura na snežnem robu, z značilno vrednostjo med 0 °C in -10 °C. Zapišimo enačbo (27) v diskretni obliki, s pomočjo katere lahko izračunamo v enodimenzionalni geometriji približni potek temperature po posameznih pasovih

$$T_i^{(j+1)} = \frac{1}{B + K} \left[\frac{j_0}{4} (1 - a_i) f_i - A + K \frac{\sum_i T_i^{(j)} \cos \varphi_i}{\sum_i \cos \varphi_i} \right], \quad (30)$$

kjer je $T_i^{(j)}$ temperatura v i -tem pasu na j -tem iteracijskem koraku, ki jo podajamo v °C, φ_i zemljepisna širina, $j_0 = 1370 \text{ W/m}^2$ solarna konstanta, A in B sta empirična parametra, ki opisujeta učinek tople grede za vodno paro in CO₂, $K = 3,81 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ je koeficient, ki opisuje prenos toplotne energije med sosednjima pasovoma in funkcija f_i opisuje razporeditev vpadnega sončnega sevanja po zemljepisni širini, ki upošteva kosinus zemljepisne širine in nagib Zemlje.

V spodnji preglednici so podane vrednosti funkcije f_i in začetne temperature $T_i^{(0)}$ po posameznih pasovih zemljepisne širine. Z upoštevanjem simetrije spodnje polovice, navajamo podatke samo za zgornjo polovico zemeljske oble, ki smo jo razdelili na 9 enako velikih pasov razmaknjenih po 10 stopinj. Na podlagi izračunanih temperatur po pasovih izračunamo povprečno temperaturo na Zemlji z izrazom (28).

Preglednica 3: Uporabljeni podatki.

PAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
φ_i	85	75	65	55	45	35	25	15	5
f_i	0,5	0,531	0,624	0,770	0,892	1,021	1,120	1,189	1,219
$T_i^{(0)}$	-15	-15	-5	5	10	15	18	22	24

4. PRIMERJAVA Z MODELI SPLOŠNE CIRKULACIJE

Da se izognemo morebitnim konceptualnim napakam pri formuliranju izbranega modela in zagotovimo konsistentnost numerične sheme, je potrebno rezultate računalniškega modeliranja temeljito preveriti in primerjati z dostopnimi rezultati, ki so objavljeni v strokovni literaturi. Kot referenčni rezultati služijo analitične rešitve, eksperimentalno dobljene vrednosti ali zanesljivi rezultati numeričnih preračunov.

4.1 Sevalni prispevek ogljikovega dioksida

Dokler energija elektromagnetnega valovanja vstopa in izstopa iz podnebne sistema v nespremenjenih količinah, se ohranja energijsko ravnovesje in ostanejo povprečne temperature približno konstantne. Ravnovesje podnebne sistema se poruši, če se količina te energije zaradi zunanje motnje spremeni. Kot smo ocenili v prejšnjem poglavju 3.2, se globalna temperatura spremeni in deli podnebne sistema se morajo tem spremembam prilagoditi.

V stanju podnebne ravnovesja sta na vrhu ozračja količini vstopnega in izstopnega sevanja enaki. Vsaka sprememba v vstopnem sončnem sevanju ali v IR izstopnem sevanju Zemlje spreminja neto stanje na vrhu ozračja in temu odstopanju od energijskega ravnovesja pravimo sevalni prispevek. V različnih časovnih obdobjih so lahko zunanji prispevki, kot so sončno sevanje ali velike količine prašnih delcev, ki se sproščajo v ozračje med vulkanskimi izbruhi, različni. Vedno pa povzročajo spremembe neko naravno spremenljivost, ki je lahko pozitivna ali negativna. Pozitivna spremenljivost povzroča segrevanje površja, negativna njegovo ohlajanje.

Sevalni prispevek toplogrednih plinov je pozitiven, ker zadržujejo izstopajoče IR sevanje Zemlje in s tem povzročajo segrevanje površja Zemlje. Oblaki in aerosoli, ki sevanje odbijajo nazaj v vesolje delujejo kot hladilni mehanizem, torej povzročajo negativni sevalni prispevek. Povišano koncentracijo CO₂ v ozračju obravnavamo v nalogi kot glavnega povzročitelja trenutnega segrevanja podnebja. Ogljikov dioksid se v ozračje sprošča pri naravnih procesih v rastlinskem in živalskem svetu in pri kurjenju fosilnih goriv in drugih materialov. Delno se CO₂ iz ozračja izloči s fotosintezo, delno pa ga iz ozračja vsrkajo oceani. Zaradi spremembe koncentracije CO₂ v ozračju je sevalni prispevek (z natančnostjo okoli 10 %) podan z empirično enačbo (Schmittner, 2013, str.12)

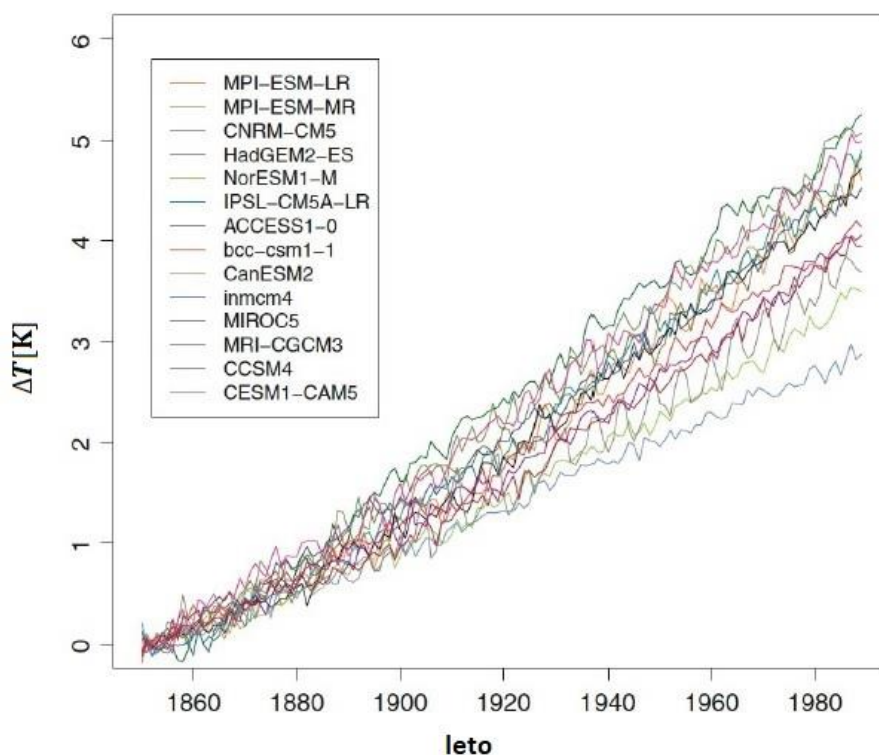
$$\Delta F = F_0 \ln \frac{C}{C_0} , \quad (31)$$

kjer je C izmerjena koncentracija CO₂ v ozračju, C_0 referenčna koncentracija, podana z vrednostjo v predindustrijskem času (280 ppm) in $F_0 = 5,35 \text{ W/m}^2$ empirična konstanta.

Definirajmo še podnebno občutljivost kot količnik med spremembo globalne povprečne temperature ozračja in sevalnega prispevka, potem ko je podnebni sistem dosegel novo ravnovesno stanje

$$\alpha = \frac{\Delta T}{\Delta F} . \quad (32)$$

Leta 2013 je bila opravljena zanimiva študija sevalnega prispevka CO₂ (Schmittner, 2013, str.11), pri kateri je bilo uporabljeno 14 naj sodobnejših znanstvenih podnebnih modelov splošne cirkulacije. Gre za tridimenzionalne numerične modele, ki vključujejo opise glavnih fizikalnih, kemijskih in bioloških procesov v ozračju in na zemeljskem površju ter njihovo medsebojno odvisnost. Avtorji navajajo vrednosti podnebne občutljivosti, s katero računajo posamezni modeli med 0,6 m²K/W in 1,1 m²K/W. Kot je razvidno iz znanstvenega prispevka, so z modeli simulirali idealiziran numerični eksperiment, pri katerem so spremljali večanje koncentracije CO₂ za 1% na leto, od leta 1850 z referenčno vrednostjo 280 ppm do leta 1990, ko bi naj koncentracija narasla na 1120 ppm. Iz slike 11 je razvidno, da so vsi modeli napovedali globalno ogrevanje ozračja v razponu temperatur od 3 K do 5 K.



Slika 11: Globalno segrevanje ozračja pri eksponentnem naraščanju koncentracije CO₂ (vir: Schmittner, 2013, str.11).

Testirajmo naš poenostavljeni energijski ravnovesni model in vrednosti primerjajmo z objavljenimi standardnimi rezultati. Najprej določimo α s predpostavko, da je planetarni albedo konstanten. Označimo ravnovesno temperaturo s T_0 in uporabimo (17)

$$(1 - a_0)j = A + BT_0, \quad (33)$$

$$(1 - a_0)j + \Delta F = A + B(T_0 + \Delta T), \quad (34)$$

od koder razberemo zvezo med podnebno občutljivostjo α in toplogrednim parametrom B

$$\alpha = \frac{1}{B}. \quad (35)$$

Iz enačbe (10) razberemo, da oddajajo tla le 38% dolgovalovnega sevanja, preostanek pa oddaja zgornji hladnejši pas ozračja. Upoštevajmo izračunano temperaturo ozračja na vrhu troposfere $T_0 = 227$ K, s pomočjo katere določimo toplogredna parametra $A = -3\sigma T_0^4 = -246$ W/m²,

$B = 4g\sigma T_0^3 = 1,64 \text{ W/m}^2\text{K}$ in še podnebno občutljivost $\alpha = 0,61 \text{ m}^2\text{K/W}$. Te vrednosti pa se presenetljivo dobro ujemajo z vrednostmi, ki jih dobijo s satelitskim merjenjem v troposferi, kot navaja prispevek (Schmittner, 2013, str. 13). Dolgovalovno sevanje, ki zapišča vrh troposfere, najdemo v omenjenem viru podano v odvisnosti od temperature z linearno regresijo $A + BT = -244 \text{ W/m}^2 + (1,66 \text{ W/m}^2\text{K}) T$.

Izračunajmo z energijskim sevalnim modelom še spremembo globalne povprečne temperature

$$\Delta T = \alpha \Delta F = 0,61 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \cdot 5,35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \ln \frac{1120}{280} = 4,5 \text{ K}, \quad (36)$$

kar je le 0,5 K nad modelskim povprečjem letnih vrednosti globalnega segrevanja, ki ga dajo modeli splošne cirkulacije. Primerjava rezultatov kaže, da naš poenostavljeni model dokaj dobro opisuje podnebje in njegovo spremenljivost v globalni skali.

5. MATEMATIČNA FORMULACIJA PROBLEMA

5.1 Aproksimacija funkcij

Naj bo funkcija $f(x)$ podana v obliki tabele

$$\begin{aligned}x &: x_1, x_2, \dots, x_n \\ f(x) &: y_1, y_2, \dots, y_n.\end{aligned}\tag{37}$$

Funkcijske vrednosti naj bodo rezultat meritev, opazovanja ali predhodnih približnih računov. Pogosto želimo najti preprosto analitično izraženo funkcijo $g(x)$, ki funkcijo $f(x)$ v celoti čim bolj aproksimira. Interpolacija je poseben primer aproksimacije, ko zahtevamo od funkcije $g(x)$, da poteka natančno skozi dane točke. Če so možne v funkcijskih vrednostih y_i znatne napake, je nesmiselno zahtevati, da zavzame funkcija $g(x)$ predpisane vrednosti. Pri tem si pomagamo z aproksimacijo, kjer je ponavadi število točk veliko v primeri s številom prostih parametrov v funkciji $g(x)$.

Funkcijo $g(x)$ iščemo navadno v nekem razredu funkcij, ki ga narekuje narava problema. Ponavadi določimo $g(x)$ kot linearno kombinacijo lahko izračunljivih linearno neodvisnih funkcij $h_0(x), h_1(x), \dots, h_m(x)$

$$g(x) = a_0 h_0(x) + a_1 h_1(x) + \dots + a_m h_m(x).\tag{38}$$

Za računanje so najenostavnejše kar potence spremenljivke x . Največkrat iščemo torej aproksimacijski polinom oblike

$$g(x) = a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m.\tag{39}$$

5.2 Metoda najmanjših kvadratov

Če so v funkcijskih vrednostih slučajne napake, potem je med funkcijami v danem razredu najbolj verjetna tista, za katero doseže izraz (Vidav, 1976, str. 485)

$$F = \sum_{i=1}^n (g(x_i) - y_i)^2\tag{40}$$

najmanjšo vrednost. Izraz F je vsota kvadratov odstopov merjenih vrednosti y_i od vrednosti aproksimacijske funkcije $g(x_i)$. To metodo določevanja aproksimacijske funkcije imenujemo metoda najmanjših kvadratov.

Če zapišemo izraz (40) kot funkcijo parametrov $a_0, a_1, \dots, a_m$

$$F(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [a_0 h_0(x_i) + a_1 h_1(x_i) + \dots + a_m h_m(x_i) - y_i]^2\tag{41}$$

vidimo, da moramo poiskati minimum funkcije $F(a_0, a_1, \dots, a_m)$. Potreben pogoj za nastop ekstrema funkcije F je, da so vsi parcialni odvodi $\partial F / \partial a_k$ enaki nič. Od tod dobimo za koeficiente a_k sistem linearnih enačb

$$\frac{1}{2} \frac{\partial F}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^n (a_0 h_0(x_i) + a_1 h_1(x_i) + \dots + a_m h_m(x_i) - y_i) h_k(x_i) = 0. \quad (42)$$

Zapišimo ta sistem v obliki (Vidav, 1976, str. 485)

$$Sa = b, \quad (43)$$

kjer je S matrika reda $m + 1$ z elementi

$$s_{jk} = \sum_{i=1}^n h_j(x_i) h_k(x_i), \quad j, k = 0, 1, \dots, m \quad (44)$$

vektor a z elementi $(a_0, a_1, \dots, a_m)$ in vektor b z elementi

$$b_j = \sum_{i=1}^n y_i h_j(x_i) \text{ , } \quad j = 0, 1, \dots, m \text{ .} \quad (45)$$

Sistem (43) imenujemo normalni sistem enačb. Matrika S je pozitivno definitna, zato ima sistem (43) enolično določeno rešitev (Vidav, 1976, str. 496), ki da minimum funkcije $F(a_0, a_1, \dots, a_m)$.

V posebnem primeru, ko iščemo $g(x)$ v obliki polinoma, je $h_i(x) = x^i$ in sistem (43) dobi posebno obliko

$$\begin{aligned} s_0 a_0 + s_1 a_1 + \dots + s_m a_m &= t_0 \\ s_1 a_0 + s_2 a_1 + \dots + s_{m+1} a_m &= t_1 \\ &\vdots \\ s_m a_0 + s_{m+1} a_1 + \dots + s_{2m} a_m &= t_m \end{aligned} \tag{46}$$

kjer je

$$s_k = \sum_{i=1}^n x_i^k, \quad t_k = \sum_{i=1}^n y_i x_i^k. \quad (47)$$

5.3 Konstrukcija empiričnih formul

V praksi je pogosto tako, da se merjena (opazovana) funkcija ne da dobro aproksimirati s polinomom primerno nizke stopnje. Poznavanje opazovanega pojava ali izkušnje narekujejo drugačno obliko aproksimacijske funkcije. Vzemimo, da želimo tabelo (37) aproksimirati s funkcijo oblike

$$g(x) = (x; a_1, a_2, \dots, a_m). \quad (48)$$

Naloga je določiti parametre v funkciji (47) tako, da se ta v nekem smislu čim tesneje prilega tabeli (37). Pri tem je $m \leq n$, navadno pa velja $m \ll n$.

Če je aproksimacijska funkcija linearno odvisna od parametrov a_k in je merilo aproksimacije vsota kvadratov odstopanj, smo ta primer obravnavali v podpoglavju 5.2. Če pa je (47) nelinearna funkcija parametrov, je mnogo težje določiti parametre po metodi najmanjših

kvadratov. Zato se navadno odpovemo metodi najmanjših kvadratov v tem smislu, da poskušamo najti minimum vsote kvadratov odstopanj

$$F(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [g(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) - y_i]^2. \quad (49)$$

Namesto tega poskušamo najprej funkcijo $g(x) = (x; a_1, a_2, \dots, a_m)$ kot funkcijo parametrov linearizirati in nato uporabiti metodo najmanjših kvadratov. Linearizacija včasih uspe že s preprosto zamenjavo spremenljivk. Take so mnoge empirične formule z dvema parametroma.

Kot primer si oglejmo dvoparametrično eksponentno odvisnost

$$y(x) = ae^{bx}, \quad (50)$$

ki je funkcija tipa Beer-Lambertovega zakona, s katerim podamo gostoto prepuščenega energijskega toka skozi plast z debelino x v odvisnosti od koncentracije C absorbirajočih delcev v raztopini. Če to enačbo logaritmiramo

$$\ln y = \ln a + bx \quad (51)$$

in vpeljemo nove oznake

$$Y = \ln y, \quad A' = \ln a, \quad B' = b, \quad X = x, \quad (52)$$

dobimo linearno odvisnost

$$Y = A' + B'X. \quad (53)$$

Tu brez težav najdemo vrednosti parametrov A' in B' po metodi najmanjših kvadratov za tabelo

$$\begin{aligned} X &: \ln x_1, \ln x_2, \dots, \ln x_n \\ Y &: \ln y_1, \ln y_2, \dots, \ln y_n. \end{aligned} \quad (54)$$

Vrednosti parametrov A' in B' izračunamo iz enačb (52). S tem nismo dobili najboljše aproksimacije za prvotno tabelo, temveč za tabelo (54). Če se premica (53) tesno prilega podatkom (54), potem tudi aproksimacija (50) za tabelirano funkcijo (37) ne more biti slaba.

6. PROGRAMSKI PAKET SCILAB

Numerična metoda predvideva uporabo računalniškega programa, ki nam omogoča hitro reševanje kompleksnih izračunov. V raziskovalni nalogi smo za programsko osnovo izbrali odprtokodni programski paket Scilab različice 6.0.1., ki ga poleg odprtosti odlikuje tudi preprostost uporabe. Scilab je programski paket za numerično računanje matematičnih funkcij. Uporaben je za računanje z vsemi znanimi oblikami števil, z matrikami, polinomi itd. Narejen je iz prevajalnika, knjižnic funkcij in knjižnic funkcij v programskih jezikih Fortran in C. S Scilabom lahko analiziramo linearne in nelinearne dinamične sisteme, je pa tudi pripomoček za numerično optimizacijo. Funkcijo, ki je definirana znotraj Scilaba, lahko uporabljamo tudi kot vhodni ali izhodni argument druge funkcije (Makarovič, 2005, str. 1–3).

6.1 Numerični algoritem

Zaradi kompleksnosti reševanja iteracijske funkcije enodimenzionalnega podnebne modela, s pomočjo katerega lahko računamo približni potek temperature po posameznih širinskih pasovih in povprečno temperaturo Zemljinega površja, smo v programskem paketu Scilab zapisali ustrezni numerični algoritem. Uporabili smo enačbi (27) in (28), ki smo ju razložili v podpoglavju 3.3. Program smo dobili na strani svetovnega spleta <https://www.scilab.org/> in ga brezplačno namestili na računalnik.

Podatke iz preglednice 3 vnesemo v program s pomočjo matrik oz. vektorjev. Prednost vektorskega oz. matričnega vnosa je v tem, da program z njim enostavno operira, dolžina algoritma je krajša in zasede manj spominskega prostora. Poleg matričnega zapisa podatkov je bilo treba pripraviti še prostor za skladiščenje dobljenih rezultatov. Takšen prostor v obliki prazne matrike zagotovimo z ukazom »zeros«.

Pri iterativnem reševanju enačb (27) in (28) z numeričnim algoritmom uporabimo različne zanke, v katerih z izbranimi programskimi funkcijami računamo enačbi po segmentih in na koncu združimo rezultate v iskani približek. Zaustavitveni kriterij nastavimo tako, da se računanje zaustavi, ko pade razlika med novim in starim približkom pod predpisano vrednost konvergenčnega kriterija ali ko število računskih operacij preseže mejno vrednost števca iteracijskih korakov, ki jo predpišemo v zanki »while«. Program, s katerim smo računali potek temperature po posameznih širinskih pasovih in globalno temperaturo Zemljinega površja, je podan kot priloga k raziskovalni nalogi.

6.2 Preverjanje pravilnosti numeričnega algoritma

Da zagotovimo konsistentnost numerične sheme, je potrebno rezultate računalniškega modeliranja še primerjati z dostopnimi rezultati, ki so objavljeni v strokovni literaturi. Testirajmo najprej delovanje računalniškega programa pri računanju povprečne temperature na Zemlji s privzetimi vrednostmi empiričnih konstant, ki opišejo učinek tople grede (Schmittner, 2013, str. 9)

$$A = 204,0 \frac{W}{m^2}, \quad B = 2,17 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}, \quad K = 3,81 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}. \quad (60)$$

Albedo a_i opišemo s stopničasto funkcijo (29), kjer je T_{kr} temperatura na snežnem robu, z značilno vrednostjo med 0 °C in -10 °C. Vrednosti funkcije f_i , ki opisuje porazdelitev vpadnega

sončnega sevanja po zemljepisni širini in začetne temperature $T_i^{(0)}$ po posameznih pasovih zemljepisne širine, povzamemo iz preglednice 3.

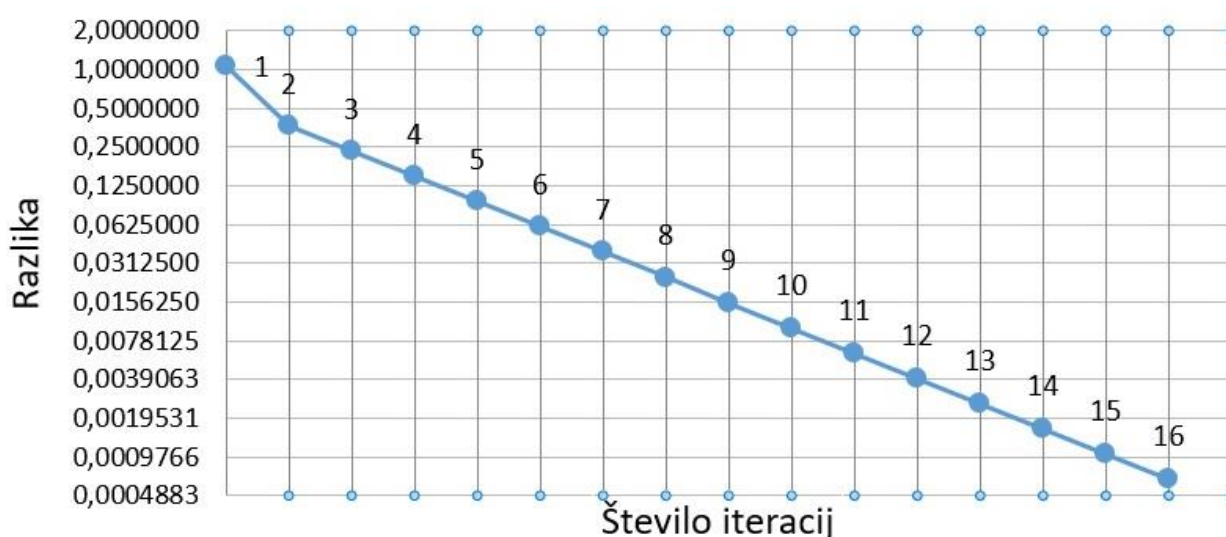
V preglednici 4 so prikazani rezultati numeričnega preračuna temperature po posameznih pasovih in povprečna temperatura Zemlje⁶. Pri $T_{kr} = -10\text{ °C}$ je vrednost numerično izračunane povprečne temperature Zemlje praktično enaka vrednosti, ki smo jo dobili z enačbo (12) v podpoglavju 3.1. Zanimal nas je tudi odziv sistema pri različnih vrednostih kritične temperature. Ugotavljamo, da je povprečna temperatura Zemlje $\bar{T}$ pomembno odvisna od izbire T_{kr} , kot je razvidno iz preglednice. Vse temperature v preglednici so podane v °C.

Preglednica 4: Temperature po širinskih pasovih in povprečna temperatura Zemlje pri različnih vrednostih kritične temperature.

T_{kr}	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	$\bar{T}$
-10	-13,183	-12,472	0,380	6,233	11,125	16,296	20,266	23,032	24,235	14,874
-5	-14,567	-13,857	-11,726	4,849	9,740	14,912	18,881	21,647	22,850	12,680
0	-14,567	-13,857	-11,726	4,849	9,740	14,912	18,881	21,647	22,850	12,680

6.3 Konvergenca rešitve in vpliv začetnih pogojev

Z izbranimi začetnimi temperaturami $T_i^{(0)}$ po posameznih pasovih računalniški algoritem iteracijsko izračunava nove približke. Definirajmo razliko med starim in novim približkom kot »razlika«. Vrednosti spremenljivke razlika se v programu izpisujejo tako, da lahko spremljamo konvergenco rešitve v odvisnosti od števila iteracij in kakšne so bile vrednosti približkov v posamezni iteraciji. Te podatke je smiselno obdelati s pomočjo programa Excel in izrisati graf, ki prikazuje, kako smo se z vsako iteracijo bližali rešitvi oz. kako se je pri danem konvergenčnem kriteriju vrednost rešitve ustalila. Za ilustracijo uporabimo primer iz preglednice 4 s $T_{kr} = -10\text{ °C}$, kjer je konvergenčni kriterij predstavljala napaka velikosti 10^{-3} . Na grafu 1 je prikazana razlika dveh zaporednih približkov v odvisnosti od števila iteracij.



Graf 1: Razlika dveh zaporednih približkov v odvisnosti od števila iteracij.

⁶ Program računa temperature po pasovih in povprečno temperaturo Zemlje na 6 decimalnih mest natančno.

Ker je število iteracij povezano z izbiro začetnih pogojev, je smiselno še preveriti, kako se sistem odzove na različno izbrane začetne temperature $T_{in}^{(0)}$ po posameznih pasovih. Ponovno smo izbrali primer iz preglednice 4 s $T_{kr} = -10\text{ °C}$, kjer je konvergenčni kriterij predstavljala napaka velikosti 10^{-3} . Rezultati numeričnih preračunov so zbrani v preglednici 5, kjer je pri izbranem začetnem približku podano še število iteracij. Ugotovili smo, da na izračunane temperature pasov ne vpliva sprememba začetnih vrednosti, dokler so izbrani začetni približki $T_i^{(0)} > T_{kr}$. Vse temperature v preglednici so podane v °C.

Preglednica 5: Število iteracij pri različno izbranih začetnih temperaturah.

$T_{in}^{(0)}$	Temperature po pasovih									Št. iteracij
$T_{i1}^{(0)}$	-15	-15	-5	5	10	18	18	22	24	16
$T_{i2}^{(0)}$	-14	-14	-4	6	11	19	19	23	25	20
$T_{i3}^{(0)}$	-13	-13	-3	7	12	20	20	24	26	20
$T_{i4}^{(0)}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20
$T_{i5}^{(0)}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
$T_{i6}^{(0)}$	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	-11	21
$T_{i7}^{(0)}$	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	21
$T_{i8}^{(0)}$	-15	-15	-11	5	10	18	18	22	24	13

7.4 Vpliv albeda na povprečno temperaturo Zemlje

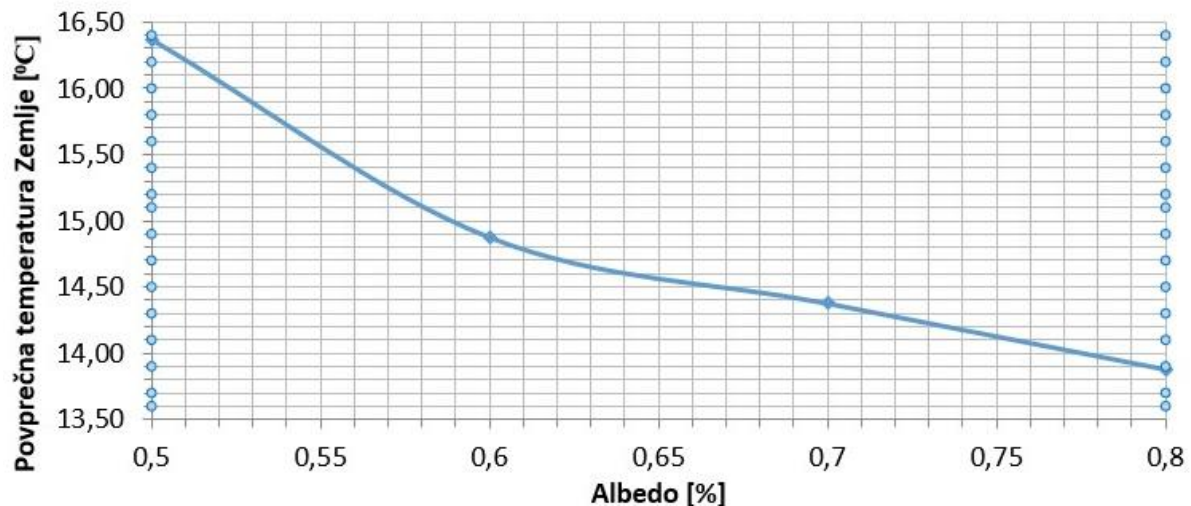
Preverimo še vpliv albeda na odziv podnebne sistema. Albedo močno vpliva na temperaturo Zemlje (enačba 12), saj je od albeda odvisna energija sončnega sevanja, ki pride v ozračje. Pričakujemo, da se zaradi povečanega albeda temperature Zemlje zniža. Na drugi strani pa se zaradi povišane temperature poveča izhlapevanje, zaradi večje količine vlage v ozračju nastane več oblačnosti, kar pomeni zmanjšanje albeda Zemlje. Albedo Zemlje pa ne povečujejo le oblaki, temveč tudi aerosol, ki prihaja v ozračje iz naravnih in antropogenih virov.

Albedo s snegom pokritih tal lahko variira v mejah med 0,5 do 0,8, odvisno od tipa vegetacije, oblačnosti in razmerja sneg/led. Morska voda ima precej nižji albedo (pri majhnem zenitnem kotu Sonca 0,03-0,1), medtem ko je povprečni albedo za kopensko površino okoli 0,15. Kljub temu pa je albedo, ki je ocenjen na vrhu ozračja veliko večji, in sicer znaša 0,3 (podpoglavje 3.1). K večjemu skupnemu albedu prispevajo predvsem oblaki in sipanje svetlobe v ozračju. V mejah med vrednostmi albeda 0,5 do 0,8 ($T_i < T_{kr}$) smo tudi raziskali občutljivost podnebne modela. Izbrali smo $T_{kr} = -10\text{ °C}$, konvergenčni kriterij je predstavljala napaka 10^{-3} .

Preglednica 6: Temperature po pasovih in povprečna temperatura Zemlje pri različnih vrednostih albeda.

α	Izračunane temperature po pasovih									$\bar{T}$
0,5	-3,640	-2,397	1,331	7,185	12,076	17,248	21,216	23,983	25,186	16,368
0,6	-13,183	-12,473	0,379	6,233	11,124	16,296	20,265	23,031	24,234	14,874
0,7	-16,364	-15,831	0,062	5,916	10,807	15,979	19,948	22,714	23,917	14,376
0,8	-19,545	-19,190	-0,255	5,598	10,489	15,662	19,631	22,397	23,599	13,878

Satelitski podatki kažejo, da se od leta 1978 morski led v Severni Ameriki zmanjšuje s stopnjo približno 3% na desetletje, kot navaja medvladni forum za podnebne spremembe (IPCC) iz leta 2007. Seveda zanima znanstvenike tudi vloga, ki jo igrajo v tem scenariju oblaki. Kaj se toraj dogaja pri globalnem segrevanju Zemlje? Sneg in led se topita, pri tem se manj energije odbije nazaj v ozračje. Ker je čedalje manj Zemljine površine prekrите s snegom ali ledom lahko sklepamo, da bo povprečna temperatura Zemljine površine v prihodnosti vedno višja.



Graf 2: Vpliv albeda na povprečno temperaturo Zemlje.

Graf 2 prikazuje povprečno temperaturo Zemlje v odvisnosti od albeda. Vidimo, da se pričakovano z večanjem albeda povprečna temperatura Zemlje niža. Primerjajmo še rezultate numerične simulacije, ki so zbrani v preglednici 6, z zanesljivimi rezultati, ki so znani in sprejeti v strokovni javnosti (Vrhovec, 2001, str. 337). Relativno dobro ujemanje rezultatov kaže na to, da je numerična shema primerna za reprodukcijo temperaturnega polja Zemlje.

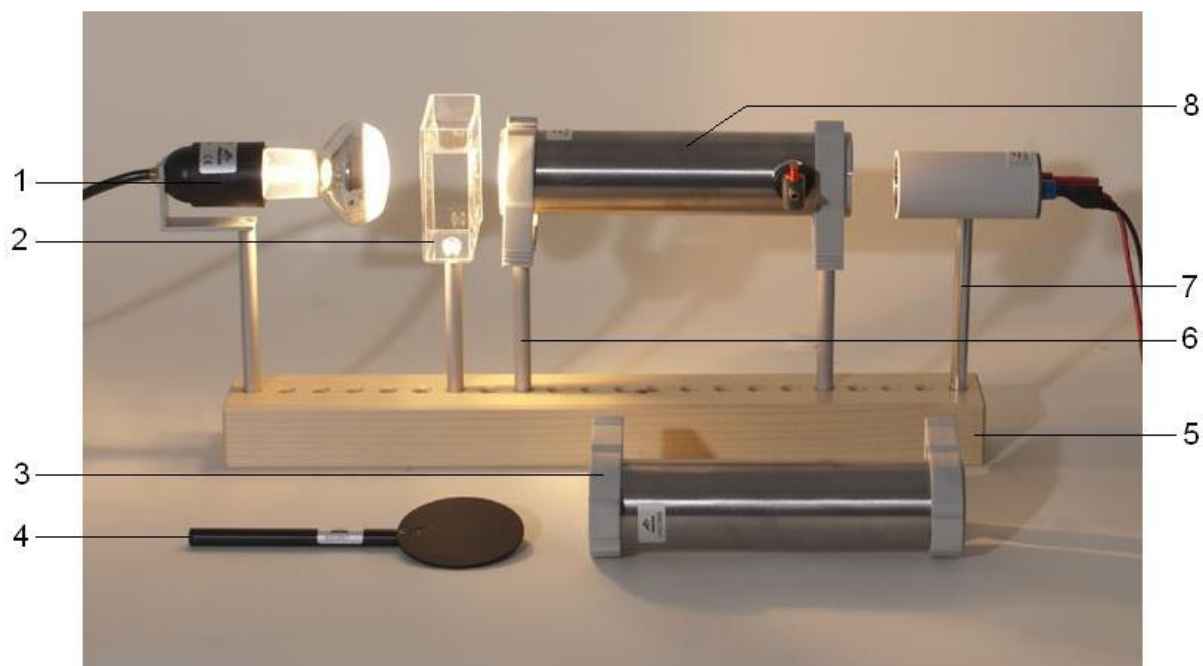
7. EKSPERIMENTALNI DEL

Najprej poudarimo, da zahteva uporaba modela energijske sevalne bilance previdnost pri simulacijah sevalnih sistemov s spektralno odvisnim absorpcijskim koeficientom. Največkrat seveda ne moremo plinov obravnavati kot sivo telo, saj je njihov absorpcijski koeficient močno odvisen od valovne dolžine. Molekule večine plinov močno absorbirajo prav v IR delu spektra. Absorpcija in emisija sta izraziti na zelo ozkih intervalih valovnih dolžin, z značilnim potekom, kot je prikazan na sliki 5. Dopuščamo možnost, da je absorpcijski koeficient odvisen tudi od temperature in tlaka, vendar moramo pri eksperimentu to odvisnost zanemariti.

7.1 Uporabljena eksperimentalna oprema

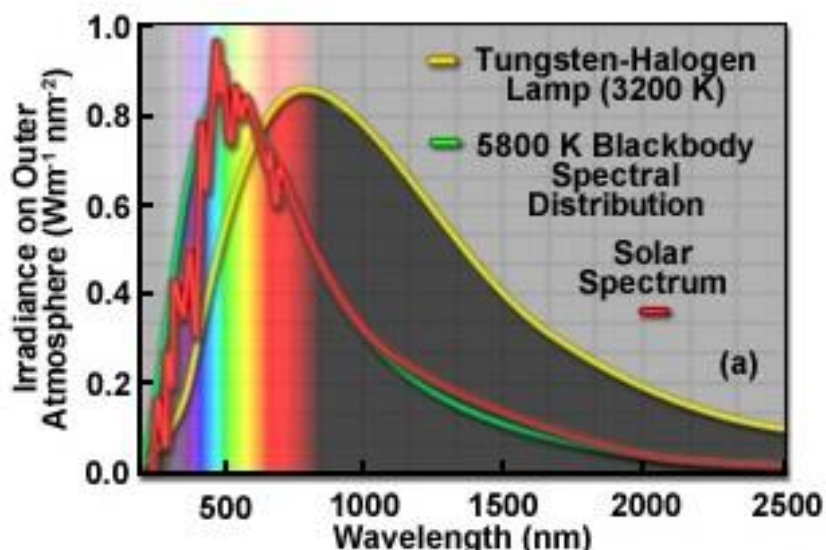
Pripomočki, ki smo jih uporabili pri merjenju prepustnosti ozračja so prikazani na sliki 12, kjer predstavljajo:

- | | |
|--|---|
| 1 reflektor z žarnico na žarilno nitko, 60 W | 5 leseni nosilec z izvrtinami, 450 mm x 70 mm |
| 2 kiveta z držalom, | 6 držalo za absorpcijsko komoro, |
| 3 absorpcijska komora, | 7 termočlen, |
| 4 kovinska ploščica, | 8 absorpcijska komora z ventili. |



Slika 12: Pripomočki, uporabljeni pri eksperimentu.

Z volframovo halogeno žarnico na žarilno nitko smo želeli čim bolj natančno simulirati spektralno porazdelitev sončnega sevanja. Na sliki 13 je prikazana relativna spektralna gostota svetlobe žarnice s sevalno temperaturo 3200 K in primerjalno še teoretični spekter sevanja črnega telesa pri temperaturi 5800 K ter spekter sončnega sevanja na vrhu ozračja. Opažamo, da je spekter svetlobe zvezen in da v spektru ni diskretnih konic. Diskretne konice namreč pomenijo veliko gostoto moči okoli posameznih valovnih dolžin. V vidnem delu spektra je poudarjena rdeča barva, vendar je pretežni del spektra (85%), ki pokriva valovne dolžine od približno 200 do 3000 nm, v področju IR svetlobe (Davidson, str. 4).



Slika 13: Spekter izsevane svetlobe volframove halogene žarnice. Rdeča barva predstavlja spektralno gostoto sončne svetlobe na vrhu ozračja, zelena barva pa predstavlja spektralno gostoto sevanja črnega telesa pri 5800 K (vir: Davidson, str. 3).

Gostoto energijskega toka vpadnega valovanja želimo s primernim detektorjem še zaznati. Pri izbiri detektorja je potrebno upoštevati predvsem območje valovnih dolžin in jakosti valovanja, ki mu je detektor izpostavljen, pa tudi šum, ki omejuje detekcijo. V IR delu spektra je namreč vedno prisotno tudi toplotno sevanje ozadja, ki prihaja iz okolice merilne naprave in od samega aktivnega elementa.

Pri izvedbi poskusa smo izbrali termočlen, ga namestili na konec nosilca in preko ojačevalca povezali z mikrovoltmetrom, kot je prikazano na sliki 14. Termočlen sestavljata dva spoja med različnima električno prevodnima elementoma, največkrat med dvema kovinama. Če poskrbimo, da sta stika pri različnih temperaturah, se med njima pojavi električna napetost, ki požene električni tok. Temperaturno razliko povzroči absorbirani energijski tok, ki pada le na en spoj. Izhodni električni signal, ki je premo sorazmeren z gostoto vpadnega energijskega toka valovanja, lahko še dodatno ojačimo z zaporedno vezavo več takih elementov, kar se imenuje termosklad (Urbančič, 2008, str. 14).

7.2 Merjenje prepustnosti vzorcev za sončno in dolgovalovno sevanje

V tej fazi je bilo potrebno pripraviti vzorce dane množine zraka s primesjo CO₂ predpisane koncentracije. Na tržišču sicer obstajajo dokaj zanesljivi merilniki koncentracije CO₂ v ozračju, vendar so bili pri našem eksperimentu zaradi majhne in omejene prostornine, v kateri smo pripravljali vzorce, praktično neuporabni. Pri določanju koncentracije smo si pomagali z balončkom, ki smo ga napolnili z zrakom. S tipalom preko vmesnika Vernier smo določili tlak p_0 zraka v balončku. S predpostavko, da je balonček skoraj okrogel, smo izračunali njegovo prostornino $V_0 = 4\pi r_0^3/3$, kjer smo polmer r_0 dobili z merjenjem obsega $2\pi r_0$. Število molekul zraka v balončku N_z izračunamo z enačbo stanja idealnega plina

$$p_0 V_0 = N_z k_B T, \quad (61)$$

kjer je $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta in T [K] temperatura zraka v balončku oz. v okolici.

V drugem delu smo v balonček iz plinske jeklenke uvedli določeno množino CO_2 in ponovili merjenje novega tlaka p ter prostornine V . Stanje zmesi podamo s plinsko enačbo

$$pV = (N_z + N_c)k_B T = N_z \left(1 + \frac{N_c}{N_z}\right) k_B T = p_0 V_0 \left(1 + \frac{N_c}{N_z}\right), \quad (62)$$

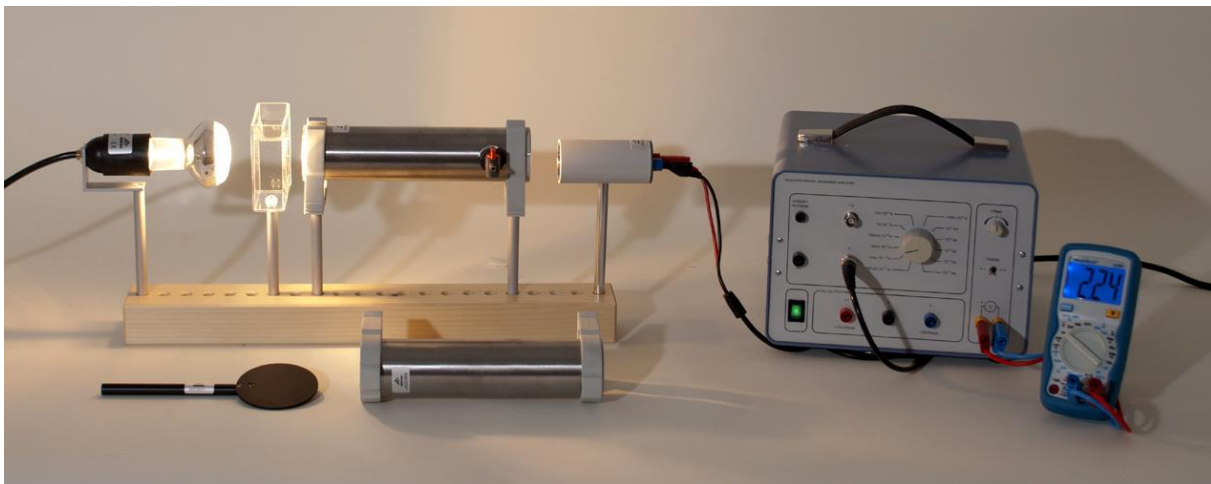
od koder izrazimo razmerje števila molekul

$$\frac{N_c}{N_z} = \frac{pV}{p_0 V_0} - 1 \quad (63)$$

in še koncentracijo CO_2

$$C = 10^6 \frac{N_c}{N_z} = 10^6 \left[\frac{p}{p_0} \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 - 1 \right]. \quad (64)$$

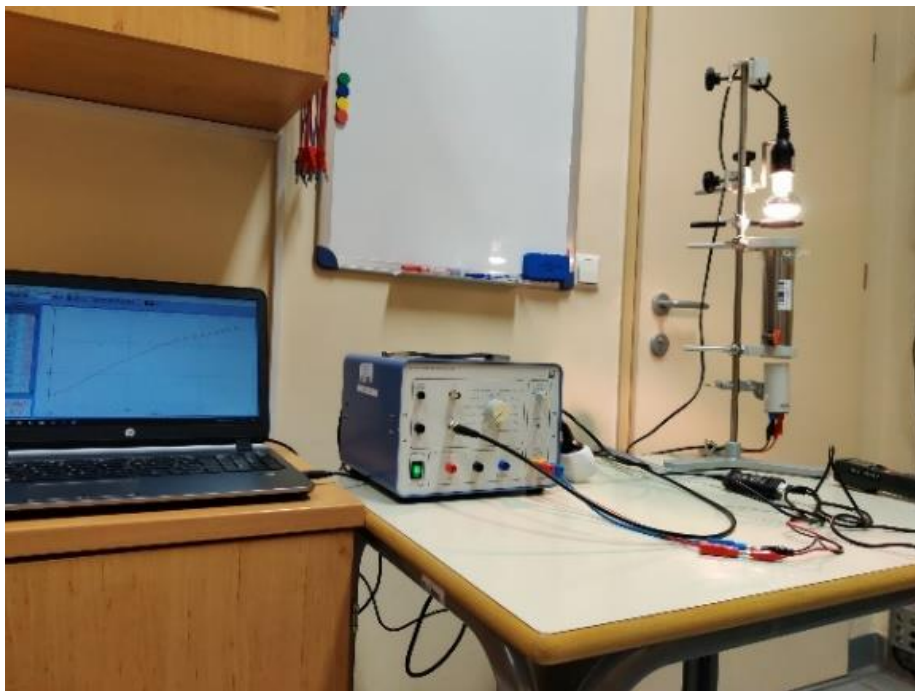
Glede na spekter izsevane svetlobe, ki je prikazan na sliki 13, predpostavljamo, da bomo kratkovalovno ($1,4 \mu\text{m}$ - $3 \mu\text{m}$) in del bližnjega IR sevanja žarnice ($0,7 \mu\text{m}$ - $1,4 \mu\text{m}$) filtrirali, če bomo svetlobni curek iz svetila pred poskusom spustili skozi primerno debelo plast vode. Zato smo v oddaljenosti približno 4 cm za žarnico pritrdili kiveto z vodo. Za kiveto smo namestili še absorpcijsko komoro, kot je prikazano na sliki 14. Pri merjenju prepustnosti za dolgovalovno sevanje nadomestimo kiveto z vodo s počrnjeno ploščico, ki jo segreva volframova halogena žarnica



Slika 14: Namestitev naprav za izvedbo poskusa.

7.3 Potek meritev

Najprej poudarimo, da smo po nekaj ponovitvah poskusa prišli do zaključka, da je bolje, če postavimo celoten merilni sistem v vertikalno lego, kot je prikazano na sliki 15. Ker ima CO_2 večjo gostoto kot zrak, smo s tako postavitvijo naprav zagotovili enostavnejše zračenje absorpcijske komore. Sicer je ostalo zaporedje naprav enako kot na sliki 14; tako smo na vrh stojala pritrdili reflektor z volframovo žarnico, sledila je kiveta z vodo, ki smo jo pri merjenju dolgovalovnega sevanja nadomestili s počrnjeno ploščico. Ploščico smo na stojalu namestili tik za žarnico in s tem preprečili, da bi se prehitro ohlajala. Za ploščico je bila nameščena absorpcijska komora in za njo termočlen, ki smo ga povezali z ojačevalcem. Izhodni napetostni signal iz ojačevalca smo pripeljali na računalnik in s programom Logger Pro brali podatke.



Slika 15: Vertikalna namestitev naprav za izvedbo poskusa.

V celoti gledano smo eksperiment določanja prepustnosti razdelili v dva dela: merjenje prepustnosti za sončno sevanje in merjenje prepustnosti za dolgovalovno IR sevanje. Vsaka meritev je potekala v enakem zaporedju korakov, le da smo pri posameznih meritvah spreminjali koncentracijo CO_2 . Meritve smo opravili z zrakom, s čistim CO_2 in pri treh naključnih koncentracijah CO_2 , ki smo jih izmerili s pomočjo balona, za katerega smo predpostavili, da je okrogel in da je v njem plin dobro premešan. Pri vsaki meritvi smo pri določeni koncentraciji CO_2 izmerili tlak v balonu, odčitali napetost termočlena in pri merjenju prepustnosti dolgovalovnega sevanja tudi temperaturo počrnjene ploščice. Prav tako smo merili tlak v prostoru, kjer je potekal eksperiment.



Slika 16: Merjenje prostornine zmesi s pomočjo balona.

Pri meritvi koncentracije CO₂ smo najprej s pomočjo kompresorja napolnili balon okrogle oblike z zrakom (če bi balon napihnili, bi vanj vnesli z izdihanim zrakom znatni delež vlage in CO₂), vendar ne do polne kapacitete. Preostali del prostornine smo napolnili s CO₂ iz jeklenke. V primeru meritev s čistim CO₂ ali zrakom nismo uporabili balona, temveč smo na absorpcijsko komoro direktno priključili jeklenko ali kompresor. Nato smo napolnjenemu balonu (slika 16) izmerili obseg s pomočjo vrvice, s katero smo ga obkrožili vedno na istem mestu ter dolžino odčitali s pomočjo metra. S pomočjo obsega balona smo izračunali njegov volumen in z vsemi pridobljenimi podatki po enačbi (64) še koncentracijo CO₂.

Napolnjeni balon smo pretresli in ga z gibljivo cevko povezali s spodnjim ventilom absorpcijske komore, kot je prikazano na sliki 17. Nato smo počasi spuščali zmes plinov skozi absorpcijsko komoro, po nekaj sekundah zaprli zgornji ventil komore ter nato še spodnjega. S programom Logger Pro smo odčitali napetost termočlena in izmerili tlak v balonu. Postopek smo ponovili pri treh različnih koncentracijah zmesi, pri čistem CO₂ in zraku.



Slika 17: Izpraznitev balona v absorpcijsko komoro.

7.4 Rezultati meritev

Pri začetnih meritvah smo ugotavljali vpliv zraka, čistega CO₂ in zmesi v absorpcijski komori na prepustnost svetlobe iz volframove halogene žarnice, s katero smo želeli čim bolj natančno simulirati spektralno porazdelitev sončnega sevanja. S prehodom svetlobnega curka skozi primerno debelo plast vode v kiveti, ki smo jo namestili pred absorpcijsko komoro, smo filtrirali kratkovalovno ($1,4\ \mu\text{m}$ – $3\ \mu\text{m}$) in del bližnjega IR sevanja žarnice ($0,7\ \mu\text{m}$ – $1,4\ \mu\text{m}$). Pri tem smo ugotovili, da se je gostota svetlobnega energijskega toka pri prehodu skozi absorpcijsko komoro zmanjšala le neznatno (za manj kot 0,5 %). S tem smo pokazali, da je ozračje skoraj prozorno za sončno sevanje.

V drugem delu meritev smo ugotavljali vpliv zraka, čistega CO₂ in zmesi v absorpcijski komori na prepustnost dolgovalovnega sevanja, s katerim smo želeli simulirati spektralno porazdelitev

sevanja Zemlje. Pri tem smo kiveto z vodo nadomestili s počrnjeno ploščico, ki smo jo nekaj minut segrevali z žarnico. Pri tem se je ploščica segrela do 438 K, kar smo izmerili z digitalnim IR termometrom. Po Wienovem zakonu ugotovimo, da ima spektralna porazdelitev sevanih elektromagnetnih valov maksimum pri valovni dolžini

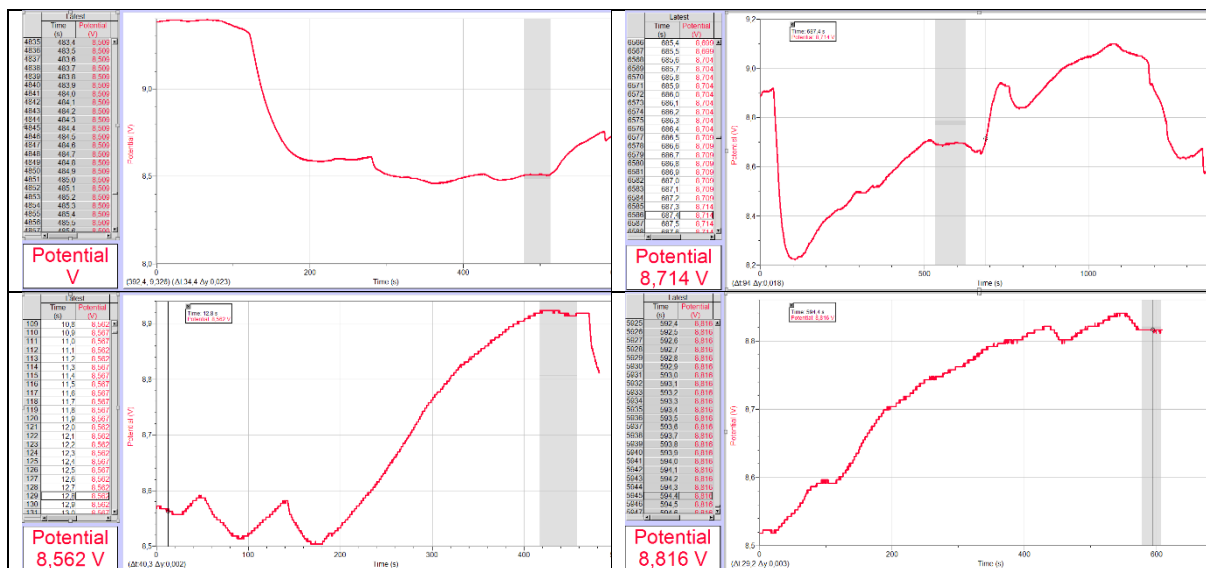
$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{438 \text{ K}} \approx 6,6 \text{ } \mu\text{m} \quad (65)$$

kjer smo s k_W označili Wienovo konstanto. Rezultat kaže, da smo z ekstremom nekoliko pod dominantnim absorpcijskim območjem CO₂, ki leži med približno 14–15 μm valovne dolžine, kot je razvidno s slike 6.

Rezultati meritev so zbrani v preglednici 7. Z o_1 smo označili obseg balona, napolnjenega z zrakom, in z o_2 obseg potem, ko smo v balon dodali še CO₂ iz jeklenke. S p_0 in s p smo označili izmerjena tlaka v balonu pred dodajanjem CO₂ in po njem, C predstavlja po enačbi (64) izračunano koncentracijo CO₂ in U izmerjeno napetost termočlena. Grafi na sliki 18 prikazujejo za čisti CO₂ ter zmesi 1, 2 in 3 časovne poteke napetosti termočlena.

Preglednica 7: Rezultati meritev.

snov	$o_1(\text{cm})$	$p_0(\text{kPa})$	$o_2(\text{cm})$	$p(\text{kPa})$	$C(\text{ppm})$	$U(\text{mV})$	$U'(\text{mV})$	$\ln U'$
zrak					800	9,39	9,370	2,238
CO ₂					1000000	8,60	8,580	2,149
zmes1	96	101,48	106	101,87	351356	8,69	8,670	2,160
zmes2	97	101,42	99	101,48	63769	8,92	8,900	2,186
zmes3	108	101,28	111	101,46	87599	8,82	8,800	2,175



Slika 18: Napetost termočlena za čisti CO₂ (levo zgoraj), zmes1 (desno zgoraj), zmes2 (levo spodaj) in zmes3 (desno spodaj) v odvisnosti od časa.

Pri konstrukciji eksponentne funkcije U' , ki se rezultatom meritev najbolje prilega, smo si pomagali s pomočjo programa Logger Pro. Glede na funkcijske vrednosti U , ki so rezultat meritev, program z metodo najmanjših kvadratov nariše eksponentno funkcijo U'

$$U'(C) = ae^{-bC} + c. \quad (66)$$

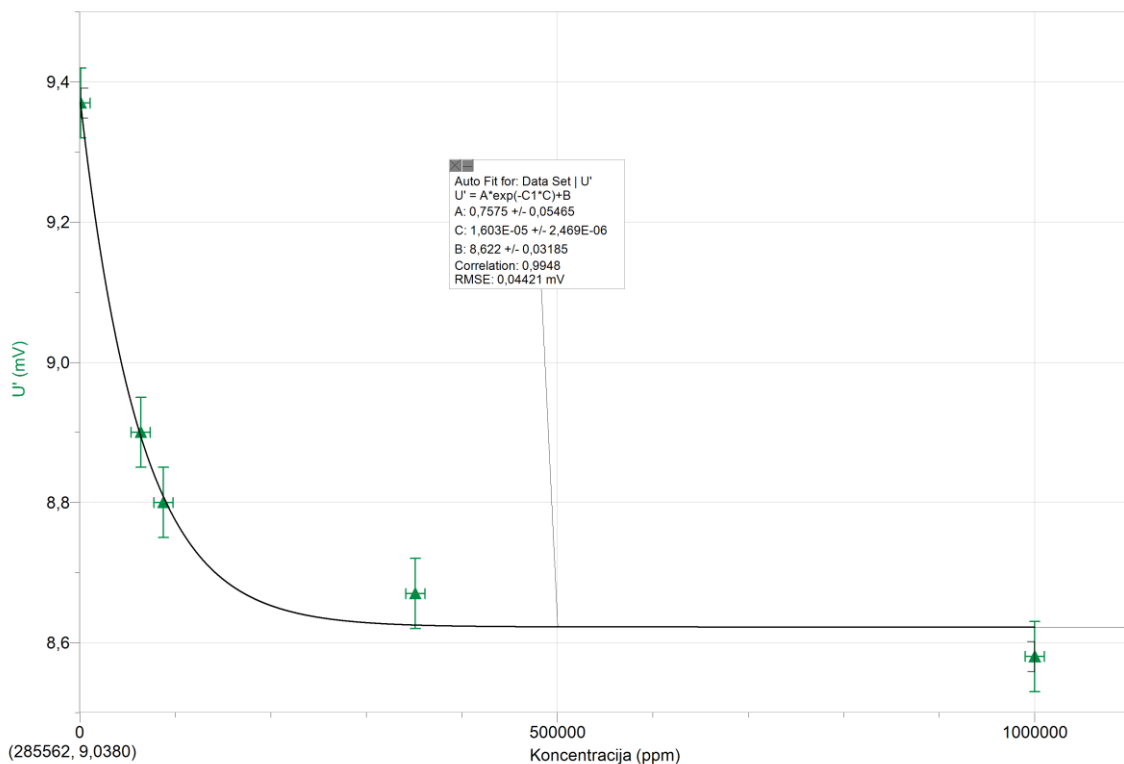
kjer so računalniško dobljene vrednosti parametrov a, b in c

$$a = (0,575 \pm 0,05465)\text{mV},$$

$$b = (1,603 \cdot 10^{-5} \pm 2,469 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{ppm}}, \quad (67)$$

$$c = (8,622 \pm 0,03185)\text{mV}.$$

V stolpcu U' preglednice 7 so zajete vrednosti aproksimacijske funkcije pri vrednostih koncentracije C . Poudariti moramo, da je zapisana vrednost koncentracije čistega CO_2 izmišljena, saj v tem primeru koncentracije, podane v ppm, ki pomeni število molekul CO_2 na milijon molekul zraka, sploh ne moremo definirati.



Graf 3: Krivulja za napetost termočlena U' , v odvisnosti od koncentracije, dobljena s pomočjo metode najmanjših kvadratov.

Odmiki posameznih izmerkov od funkcije kažejo U' kažejo, kako velika je napaka aproksimacije. Program računa efektivno napako σ po formuli

$$\sigma = \sqrt{\frac{(U_1 - U'_1)^2 + (U_2 - U'_2)^2 + \dots (U_n - U'_n)^2}{n}}, \quad (68)$$

kjer je n število izmerkov. V našem primeru znaša $\sigma = 0,04421$ mV (na sliki označeno z RMSE). Od tod ocenimo relativno napako na okoli 2%.

8. OBDELAVA REZULTATOV MERITEV

V nalogi nas je zanimala prepustnost ozračja pri znatno nižjih koncentracijah CO₂, kot so bile tiste, s katerimi smo posneli krivuljo za napetost termočlena v odvisnosti od koncentracije. Zato smo funkcijsko odvisnost, ki podaja gostoto prepuščenega energijskega toka skozi plast vzorca z debelino x v odvisnosti od koncentracije, C najprej linearizirali. Ker merske točke, ki pripada čistemu CO₂ ne upoštevamo, pričakujemo, da bodo vrednosti parametrov v funkcijski odvisnosti U_t nekoliko drugačne od tistih, ki jih je izračunal program z metodo najmanjših kvadratov.

8.1 Linearna aproksimacijska funkcija

Predpostavimo, da je gostota energijskega toka sorazmerna z napetostjo termočlena, pa lahko enačbo (5) pri konstantni debelini $x = d$ prepišemo v naslednjo obliko

$$U_t(\lambda, C) = U_0(\lambda)e^{-k(\lambda)Cd} \quad (68)$$

in po logaritmiranju

$$\ln U_t = \ln U_0 - kdC. \quad (69)$$

Vpeljimo nove oznake

$$y = \ln U_t, \quad a_0 = \ln U_0, \quad a_1 = -kd, \quad x = C. \quad (70)$$

Za tabelo

$$\begin{aligned} x &: C_1, C_2, \dots, C_n \\ y &: \ln U_{t1}, \ln U_{t2}, \dots, \ln U_{tn} \end{aligned} \quad (71)$$

poiščimo po metodi najmanjših kvadratov linearno aproksimacijsko funkcijo

$$f(x) = a_0 + a_1x. \quad (72)$$

Sistem enačb za koeficienta a_0 in a_1 je

$$\begin{aligned} s_0a_0 + s_1a_1 &= t_0 \\ s_1a_0 + s_2a_1 &= t_1, \end{aligned} \quad (73)$$

kjer je po (46)

$$s_0 = 4, \quad s_1 = \sum_{i=1}^4 x_i, \quad s_2 = \sum_{i=1}^4 x_i^2, \quad t_0 = \sum_{i=1}^4 y_i, \quad t_1 = \sum_{i=1}^4 y_i x_i. \quad (74)$$

Po krajšem računu dobimo za koeficienta naslednja izraza

$$a_0 = \frac{t_1s_1 - t_0s_2}{s_1^2 - s_0s_2}, \quad a_1 = \frac{t_0s_1 - t_1s_0}{s_1^2 - s_0s_2}. \quad (75)$$

Pri izračunavanju koeficientov smo si pomagali z računalniškim programom Microsoft Excel. Tako dobimo za numerični vrednosti koeficientov $a_0 = 2,21069$ in $a_1 = -1,66354 \cdot 10^{-7}$ in

lahko z aproksimacijsko linearno funkcijo $f(C)$ izrazimo $\ln U_t$ pri poljubno izbrani koncentraciji.

8.2 Določanje prepustnosti ozračja

Z enačbo (4) smo razmerje med gostoto prepuščenega in vpadnega energijskega toka pri dani valovni dolžini vpeljali kot prepustnost zmesi

$$\tau(\lambda) = \frac{j_t(\lambda)}{j_0(\lambda)} = \frac{U_t(\lambda)}{U_0(\lambda)} = e^{-k(\lambda)Cx}. \quad (76)$$

Pri dani koncentraciji zmesi C v absorpcijski komori z dolžino $x = d = 20,5$ cm lahko po enačbi (76) izračunamo njeno prepustnost kot

$$\tau_d(\lambda) = e^{-|a_1|C} \approx 1 - |a_1|C, \quad (77)$$

kjer smo zaradi majhne vrednosti eksponenta $|a_1|C$ razvili eksponentno funkcijo v Taylorjevo vrsto in upoštevali le linearni člen razvoja.

Pojavi se vprašanje, kako pri enaki koncentraciji oceniti prepustnost ozračja mnogo večjih dimenzij $h \gg d$. Uporabimo (76) in predpostavimo, da se absorpcijska konstanta $k(\lambda)$ z višino ne spremeni

$$\tau(\lambda, h) = e^{-k(\lambda)Ch}. \quad (78)$$

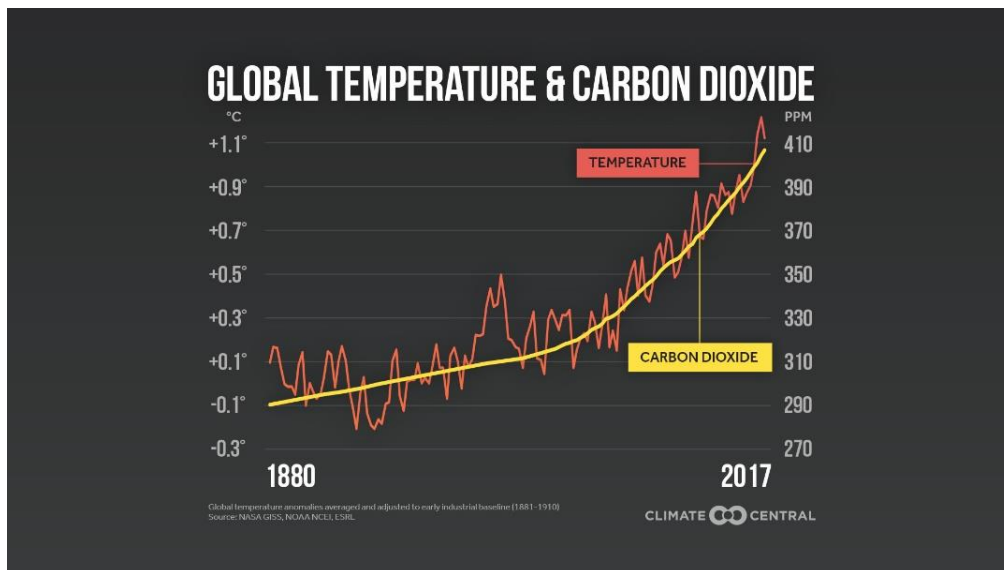
Enačba (78) potrjuje domnevo, da se prepustnost ozračja z dano koncentracijo CO_2 za dolgovalovno sevanje valovne dolžine λ z višino h eksponentno zmanjšuje. Enačbi (77) in (78) logaritmujemo in delimo

$$\frac{\ln \tau}{\ln \tau_d} = \frac{h}{d} \Rightarrow \tau(h) = \tau_d^{\frac{h}{d}}, \quad (79)$$

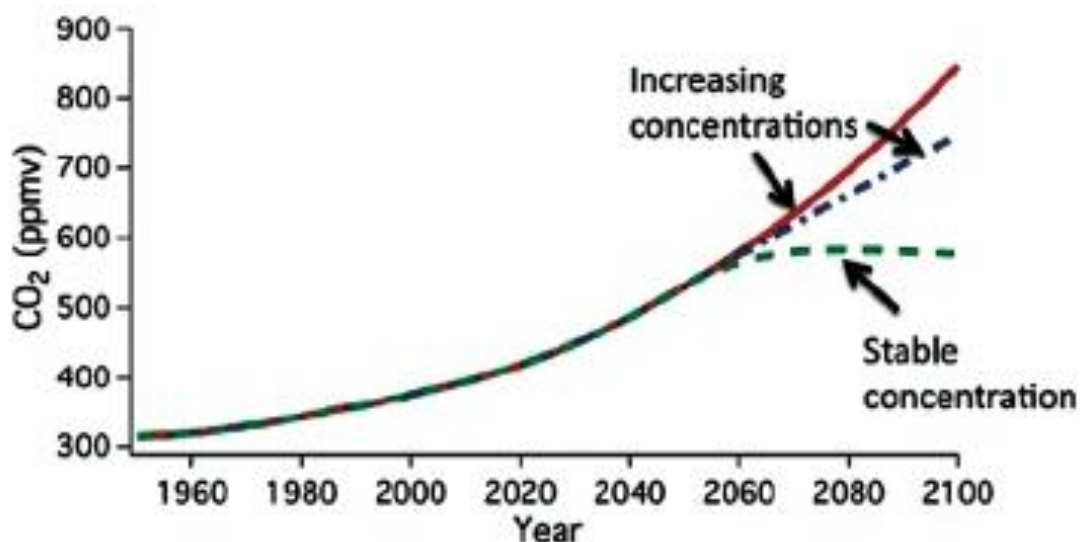
pa dobimo pri enaki koncentraciji zvezo v obliki potenčne funkcije med prepustnostjo ozračja in prepustnostjo zmesi v absorpcijski komori.

8.3 Modeliranje koncentracije CO_2 v ozračju

Ogljikov dioksid je sicer naraven toplogredni plin, vendar njegov antropogeni dodatek prispeva kar 60% k dodatnemu toplogrednemu učinku. Slika 19 prikazuje spreminjanje koncentracije CO_2 v ozračju in povprečne letne temperature Zemlje med letoma 1880 in 2017. S slike razberemo, da se je v tem obdobju povečala koncentracija CO_2 za več kot 40% in povprečna letna temperatura Zemlje za približno $1,1$ °C. To še vedno ne pomeni, da je CO_2 glavni in edini krivec za sprembo temperature saj vemo, da je količina CO_2 v naravnem ravnotežju zelo velika in človeška aktivnost k temu prispeva le majhen, a pomemben neuravnoteženi del. V vsakem primeru pa simulacije s podnebnimi modeli kažejo, da se bo trend naraščanja koncentracije CO_2 nadaljeval še vsaj nekaj desetletij (mogoče celo stoletij). Na sliki 20 so prikazani trije različni scenariji spreminjanja koncentracije CO_2 do konca 21. stoletja (Vetrnica, 2011, str. 21). Kot navaja omenjeni vir, prekašajo izpusti CO_2 sposobnost ponorov in bi jih bilo potrebno zmanjšati vsaj za 80%, da bi se koncentracija CO_2 ustalila.



Slika 19: Spreminjanje koncentracije CO₂ v ozračju (rumeno) in povprečne letne temperature Zemlje (rdeče) med leti 1880 in 2017 (vir: Climate Central, 2018).



Slika 20: Trije različni scenariji spreminjanja koncentracije CO₂ v ozračju do konca 21. stoletja (vir: Vetrnica, 2011, str. 21).

V podpoglavju 4.1 smo omenili zanimivo študijo sevalnega prispevka CO₂, v kateri so avtorji z zahtevnimi modeli splošne cirkulacije simulirali idealiziran numerični eksperiment, pri katerem so spremljali večanje koncentracije CO₂ za 1% na leto, od leta 1850 z referenčno vrednostjo 280 ppm do leta 1990, ko bi naj koncentracija narasla na 1120 ppm. S slike 20 razberemo, da bi po najbolj pesimističnem scenariju, ki predvideva nadaljevanje intenzivnega gospodarstva ter pripadajoče spremembe *ph* oceanov in kemijskega ravnovesja karbonatov, narasla koncentracija do konca 21. stoletja kar do okoli 850 ppm.

9. ANALIZA IN DISKUSIJA

Kot smo pojasnili v podpoglavju 2.1, poteka med elementi podnebne sistema v različno dolgih časovnih obdobjih vrsta fizikalnih, bioloških in kemijskih procesov. Čeprav se elementi podnebne sistema zelo razlikujejo v svoji sestavi, obnašanju in fizikalnih ter kemijskih lastnostih, so vsi med seboj povezani s pretoki mase in energije. Zaradi velike kompleksnosti ostaja tudi danes mnogo povezav med elementi podnebne sistema slabo raziskanih. Zagotovo pa vemo, da vsaka sprememba v elementih sistema, naravna ali antropogena, povzroča spremembe podnebja.

V nalogi smo raziskovali ozračje, ki je zagotovo najbolj nestabilen in nenehno spreminjajoči se del podnebne sistema. Sestava ozračja se je skozi zgodovino Zemlje spreminjala, danes pa suho ozračje sestoji predvsem iz dušika (78,1%), kisika (20,9%) in argona (0,93%). Kot vemo ti plini ne vplivajo znatno na kratkovalovno sončno sevanje, niti na dolgovalovno IR sevanje Zemlje. Med toplogrednimi plini, ki močno absorbirajo elektromagnetno valovanje z večjimi valovnimi dolžinami in igrajo ključno vlogo v energijski bilanci Zemlje, smo se izključno osredotočili le na prispevek CO₂.

V uporabljenem modelu, s katerim smo v nalogi raziskovali vpliv spremembe koncentracije CO₂ na povprečno temperaturo Zemlje ter približni potek temperature po zemeljskih širinskih pasovih, smo privzeli:

- konstantno vrednost gostote svetlobnega toka, ki s Sonca vpade na vrh zemeljskega ozračja $j_0 = 1370 \text{ W/m}^2$. To seveda ne drži, saj je znano, da se izsev Sonca in posredno tudi energija, ki jo prejme Zemlja od Sonca, spreminjata v ciklih na približno 11 let z amplitudo 0,1%. Spremembe Sončeve aktivnosti se vidno odražajo v temperaturi ozračja predvsem v zadnjih stoletjih (Dolinar, 2018, str. 11).
- konstantno vrednost albeda Zemlje $a = 0,3$ ($T_i > T_{kr}$) in $a = 0,6$ ($T_i < T_{kr}$), čeprav vemo, da je le-ta močno odvisen od narave površja, razporeditve vegetacije, snežne odeje ipd..
- Pri opisu prenosa energije med sosednjima pasovoma upoštevamo vrednost transportnega koeficienta $K = 3,18 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Budyko, 1969, str. 613), čeprav predlagajo nekateri avtorji drugačne vrednosti.
- V vseh numeričnih izračunih upoštevamo kritično temperaturo $T_{kr} = -10 \text{ } ^\circ\text{C}$, pri kateri predvideva model spremembo tla/morje v sneg/led.

9.1 Toplogredna parametra A in B

Kot povzamemo iz prispevka (Rakovec, Žagar, 2011, str. 70) se vreme spreminja predvsem v troposferi, t.j. plasti ozračja, ki sega do višine približno 9 km nad polarnimi in do višine kakih 16 km nad ekvatorialnimi predeli. Vendar je za napovedovanje vremena treba poznati razmere po vsem ozračju-od tal skozi troposfero do višine približno 50 km nad tlemi, saj imajo tudi zračni tokovi v stratosferi vpliv na vremensko dogajanje v troposferi. Kot poročata avtorja v tem območju tudi satelitsko⁷ pridobivajo različne podatke o sevanju CO₂, ki pomagajo določati količino tega plina v ozračju.

⁷ Sateliti so opremljeni z radiometri, ki pošiljajo proti Zemlji IR valove pri takšni valovni dolžini, pri kateri neki plin v ozračju absorbira, ki je torej v resonanci s kakim od vibracijskih načinov.

V nalogi smo testirali energijski ravnovesni model s simulacijami koncentracije CO_2 z vrednostmi med 280 ppm in 1120 ppm pri dveh višinah ozračja: 15 km in 30 km nad tlemi. V resnici se vsebnost CO_2 v ozračju tudi nekoliko spreminja preko letnih časov in iz kraja v kraj, vendar teh sprememb v nalogi ne moremo upoštevati. S pomočjo enačbe (77) smo pri izbrani koncentraciji C izračunali najprej prepustnost absorpcijske komore τ_d z dolžino $d = 20,5$ cm. Z znano vrednostjo τ_d smo v drugem delu po enačbi (79) izračunali še prepustnost ozračja τ z višino h . Z znano vrednostjo prepustnosti smo pri dani višini izračunali še toplogredni faktor $g = (1 + \tau)/2$, ki nastopa v obeh empiričnih toplogrednih parametrih

$$A = -3g\sigma T_0^4, \quad B = 4g\sigma T_0^3. \quad (80)$$

Ker sta A in B odvisna od temperature tal zemeljskega površja, smo njuni vrednosti računali iterativno. Z začetnim približkom temperature tal smo najprej izračunali začetni vrednosti obeh toplogrednih parametrov, s katerima smo po enačbi (27) izračunali temperaturo i -tega širinskega pasu in po (28) še povprečno temperaturo Zemlje. Izračunano temperaturo Zemlje smo izbrali kot novi približek za izračun parametrov A in B . Tako smo ob predpisanim zaustavitvenem kriteriju postopek iterativno nadaljevali. Pri računanju smo si pomagali s kombinirano uporabo programa Excel, s katerim smo izračunavali parametra A in B ter z uporabo programa Scilab, s katerim smo računali povprečno temperaturo Zemlje.

Preglednica 8: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 15 km.

$C(\text{ppm})$	τ	g	A	B	$\bar{T}(^\circ\text{C})$
280	0,5965	0,7983	208,4521	3,8720	7,2517
300	0,5662	0,7831	202,3621	3,7035	8,4688
400	0,4732	0,7366	196,1845	3,5234	11,3804
500	0,3934	0,6967	192,8320	3,3411	12,8763
600	0,3301	0,6651	191,8743	3,3876	13,9671
700	0,2746	0,6373	190,4288	3,3655	14,5543
800	0,2251	0,6123	189,7632	3,3185	15,1612
900	0,1733	0,5867	189,2342	3,2945	15,5286
1000	0,1357	0,5679	188,6345	3,2743	15,7096
1100	0,1030	0,5515	188,2130	3,2341	15,8109
1120	0,1029	0,5514	187,9714	3,2253	15,8988

Preglednica 9: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 30 km.

$C(\text{ppm})$	τ	g	A	B	$\bar{T}(^\circ\text{C})$
280	0,3558	0,6779	195,8321	3,5643	11,3623
300	0,3206	0,6603	194,3206	3,4979	12,3814
400	0,2232	0,6116	189,5118	3,3676	14,7163
500	0,1548	0,5774	187,9849	3,1739	16,1710
600	0,1090	0,5545	187,3531	3,0714	16,9840
700	0,0810	0,5405	187,0308	3,0084	17,5063
800	0,0530	0,5265	186,9747	2,9426	17,8558
900	0,0336	0,5168	186,9561	2,8971	18,1428
1000	0,0202	0,5101	186,9499	2,8656	18,3452
1100	0,0158	0,5079	186,9479	2,8549	18,4454
1120	0,0106	0,5053	186,8596	2,8437	18,4868

V preglednicah 8 in 9 so pri izbranih koncentracijah in albedu zbrane izračunane vrednosti toplogrednih parametrov pri višinah ozračja 15 in 30 km. Drugi in tretji stolpec vsebujeta vrednosti prepustnosti ozračja τ in toplogrednega faktorja $g = (1 + \tau)/2$. Vrednosti toplogrednih parametrov A in B , s katerima izračunamo povprečno temperaturo Zemlje $\bar{T}$, so zbrane v četrtem in petem stolpcu. V preglednici 10 so pri izbranih koncentracijah in višini ozračja 30 km prikazani še rezultati numeričnega preračuna temperature po posameznih širinskih pasovih.

Preglednica 10: Temperature po posameznih širinskih pasovih pri višini ozračja 30 km.

C	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	$\bar{T}$
280	-14,249	-13,602	-1,876	3,465	7,928	12,646	16,268	18,792	19,890	11,362
300	-13,887	-13,222	-1,190	4,289	8,868	13,709	17,425	20,015	21,141	12,381
400	-12,391	-11,704	0,733	6,397	11,129	16,134	19,975	22,652	23,816	14,716
500	-11,619	-10,922	1,689	7,434	12,234	17,309	21,204	23,918	25,099	16,171
600	-11,175	-10,462	2,430	8,302	13,208	18,396	22,378	25,153	26,359	16,984
700	-11,125	-10,401	2,712	8,683	13,674	18,950	22,999	25,822	27,049	17,506
800	-11,077	-10,329	2,814	8,891	13,969	19,338	23,459	26,331	27,579	17,856
900	-10,942	-10,205	3,122	9,192	14,263	19,626	23,742	26,611	27,858	18,143
1000	-10,767	-10,129	3,321	9,401	14,481	19,853	23,976	26,850	28,099	18,345
1100	-10,583	-10,068	3,333	9,437	14,537	19,929	24,068	26,953	28,207	18,445
1120	-10,408	-10,042	3,368	9,476	14,579	19,977	24,118	27,005	28,260	18,487

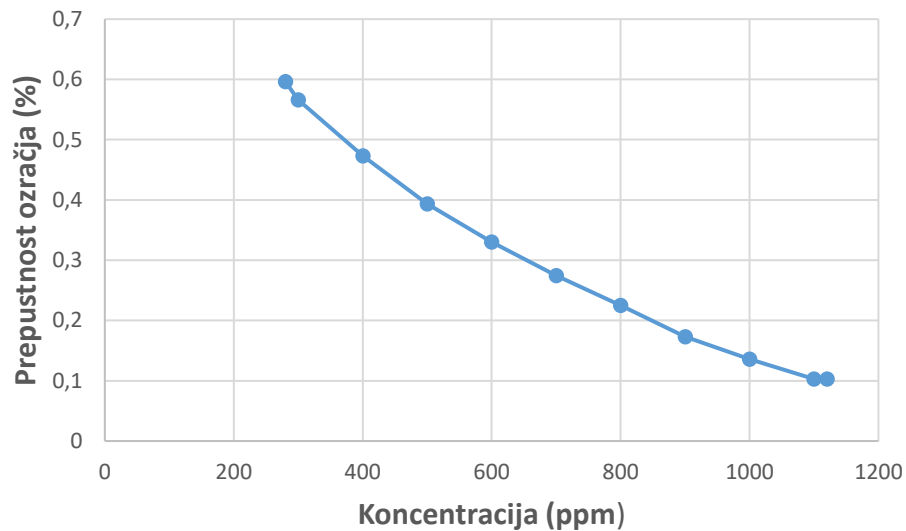
9.2 Vpliv koncentracije CO₂ na prepustnost ozračja

S stališča človeštva je sestava naravnega ozračja skoraj stalnica, ki jo občasno spremenijo močni vulkanski izbruhi prahu in plinov. Ta stalnost pa je v zadnjem stoletju dodobra načeta glede vsebnosti CO₂, predvsem zaradi antropogenih virov. Ravni CO₂ v ozračju, ki v zadnjih desetletjih eksponentno rastejo, bodo po pričakovanjih znanstvenikov letos dosegle v povprečju 410 ppm. To je najvišja raven v vsaj 800.000 letih.

Ob čistem in jasnem vremenu je prepustnost ozračja za dolgovalovno sevanje Zemlje slabih 30%, predvsem na račun močne absorpcije (Vrhovec, 2001, str. 337). Glavni absorbent je seveda vodna para. Njen delež je sicer krajevno in časovno spremenljiv, vendar v povprečju okoli 60% vse absorpcije dolgovalovnega sevanja Zemlje prispeva prav vodna para in le okoli četrtino CO₂.

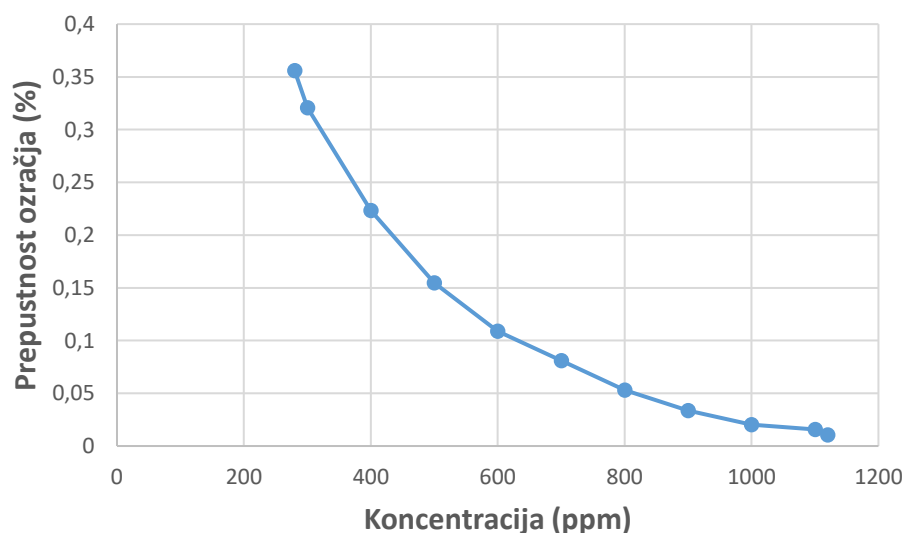
Najprej si oglejmo rezultate prepustnosti ozračja v odvisnosti od koncentracije CO₂ dobljene s predpostavko, da se ozračje zaključi v višini 15 km nad zemeljskim površjem, kot prikazuje preglednica 8. V tem modelu bi znašala prepustnost ozračja v predindustrijskem času pri koncentraciji $C = 280$ ppm CO₂ kar približno 60% in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400$ ppm okoli 47%. Kljub relativno majhni višini ozračja presenečajo dokaj visoke vrednosti

prepustnosti. Na grafu 4, ki prikazuje odvisnost prepustnosti ozračja od koncentracije CO_2 , opazimo eksponentno padanje v skladu z enačbo (78).



Graf 4: Prepustnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 15 km.

Primerjajmo rezultate simulacije še z vrednostmi za prepustnost pri višini ozračja 30 km, ki jih povzamemo iz preglednice 9. Za prepustnost ozračja pri koncentraciji $C = 280$ ppm dobimo sedaj okoli 36% in pri današnjih pogojih, z ocenjeno vrednostjo koncentracije CO_2 $C \approx 400$ ppm, nekaj čez 22%, kar precej bolje ustreza satelitsko izmerjeni vrednosti slabih 30%, ki jo navaja pri jasnem vremenu strokovna literatura. Graf 5 prikazuje odvisnost prepustnosti ozračja od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km nad površjem Zemlje.



Graf 5: Prepustnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.

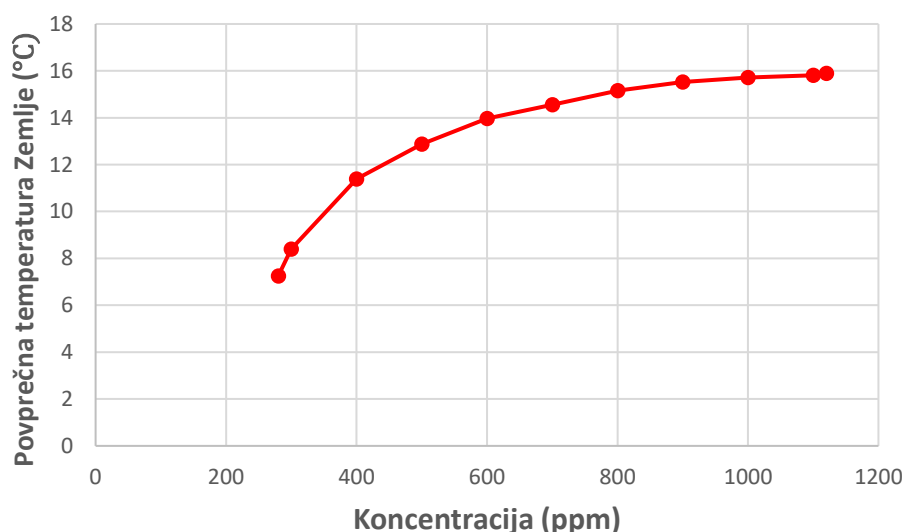
Napravimo še nekaj primerjav rezultatov obeh numeričnih izračunov. Opažamo, da vrednosti prepustnosti pri koncentracijah 300, 400 in 500 ppm v preglednici 9 dobro sovpadajo z

vrednostmi v preglednici 8 pri vrednostih koncentracije 600, 800 in 1000 ppm. To je povsem v skladu z enačbo (78), po kateri se vrednost prepustnosti ne spremeni, če ostane produkt koncentracije in višine Ch v eksponentu enačbe konstanten. Iz preglednice 9 tudi razberemo, da postane ozračje za dolgovalovno sevanje Zemlje pri koncentracijah nad približno 1000 ppm pri višini 30 km slabo prepustno, medtem ko bi bila prepustnost pri 15 km debelem plašču ozračja še vedno dobrih 10%.

9.3 Vpliv koncentracije CO₂ na povprečno temperaturo Zemlje

Preden se lotimo analize rezultatov računalniškega modeliranja, s katerim smo ugotavljali vpliv koncentracije CO₂ na povprečno temperaturo Zemlje, povzemimo nekaj referenčnih rezultatov, ki so eksperimentalno dobljene vrednosti ali zanesljivi rezultati numeričnih preračunov:

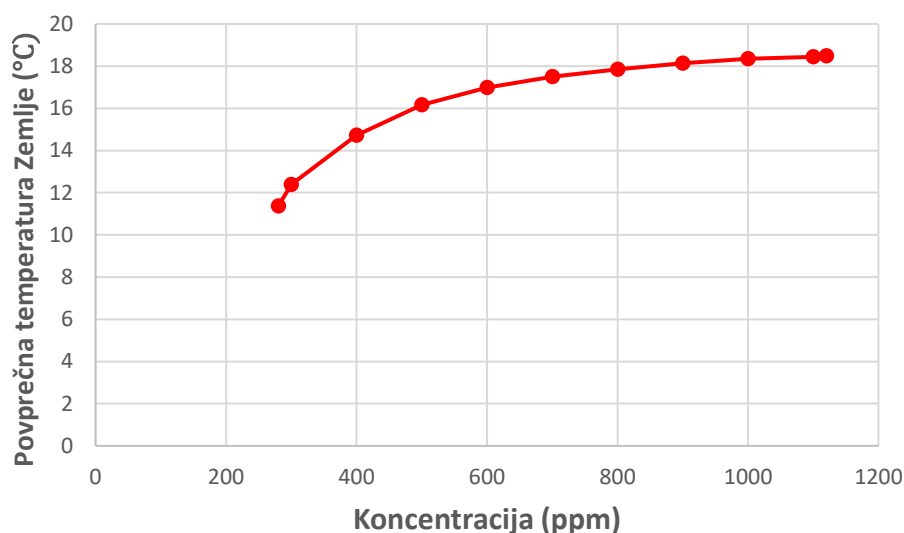
- instrumentalna opazovanja v preteklih 100 letih kažejo na dvig povprečne globalne temperature zraka pri tleh za okoli 0,8 °C (Vetrnica, 2011, str. 20).
- Z zahtevnimi tridimenzionalnimi modeli so ugotovili, da bi se pri podvojitvi koncentracije CO₂ s 300 ppm na 600 ppm morala povprečna temperatura na Zemlji dvigniti za 1,8 do 3,4 K (Vrhovec, 2001, str. 334).
- Na Agenciji RS za okolje ugotavljajo v okviru projekta Podnebna spremenljivost Slovenije, da se je povprečna temperatura zraka v zadnjih petdesetih letih dvignila kar za 1,7 °C (Dolinar in ostali, 2010, str. 2).
- V obdobju med letoma 1880 in 2017 se je povečala koncentracija CO₂ za več kot 40% in povprečna letna temperatura Zemlje za približno 1,1 °C (Climate Central, 2018).
- S študijo sevalnega prispevka CO₂ (Schmittner, 2013, str.11), pri kateri so spremljali večanje koncentracije CO₂ za 1% na leto, od leta 1850 z referenčno vrednostjo 280 ppm do leta 1990, ko bi naj koncentracija narasla na 1120 ppm, so napovedali globalno ogrevanje ozračja v razponu temperatur od 3 K do 5 K.
- Danes ocenjujejo povprečno temperaturo Zemlje na 14-15 °C (Schmittner, 2013, str. 7).



Graf 6: Povprečna temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO₂ pri višini ozračja 15 km.

Kot prvi numerični primer si oglejmo rezultate povprečne temperature Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO₂ dobljene s predpostavko, da se ozračje zaključi v višini 15 km nad

zemeljskim površjem, kot jih povzamemo iz preglednice 8. Iz preglednice ali iz grafa 6 razberemo, da bi znašala povprečna temperatura Zemlje pri koncentraciji $C = 280$ ppm $7,3$ °C in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400$ ppm $11,4$ °C, kar pomeni dobre 3 °C pod dejansko temperaturo. V tem modelu naj bi od predindustrijskega časa do danes narasla povprečna temperatura Zemlje za okoli 4 °C, kar krepko presega zanesljivo vrednost $1,1$ °C, ki jo navaja vir (Climate Central, 2018). Tudi temperaturna razlika med stanjem ozračja s koncentracijo 280 in 1120 ppm je relativno velika $8,6$ °C.



Graf 7: Povprečna temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.

Oglejmo si še povprečno temperaturo Zemlje ob spremembah koncentracije s predpostavko, da se ozračje zaključi v višini 30 km nad zemeljskim površjem, kot jih povzamemo iz preglednice 9. Iz preglednice ali iz grafa 7 razberemo, da bi tokrat znašala povprečna temperatura Zemlje pri koncentraciji $C = 280$ ppm $11,4$ °C in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400$ ppm $14,7$ °C, kar se presenetljivo dobro ujema z referenčno vrednostjo med 14 in 15 °C, ki jo navaja vir (Schmittner, 2013, str. 7). V tem modelu naj bi od predindustrijskega časa do danes narasla povprečna temperatura Zemlje za okoli $3,4$ °C, kar še vedno presega referenčno vrednost $1,1$ °C. Temperaturna razlika med stanjem ozračja s koncentracijo 280 in 1120 ppm znaša sedaj sprejemljivih $7,1$ °C.

Namenimo še nekaj besed preglednici 10, kjer so zbrane povprečne temperature Zemlje in temperature po posameznih širinskih pasovih pri višini ozračja 30 km. Iz preglednice 9 tudi razberemo, da povprečna temperatura Zemlje pri koncentracijah nad 1000 ppm nekoliko presega 18 °C, čeprav vidimo, da je v tem področju koncentracij ozračje za dolgovalovno sevanje Zemlje dokaj slabo prepustno. Tukaj se ponovno sklicujmo na vir (Vrhovec, 2001, str. 337), kjer zvemo, kaj bi se zgodilo na Zemlji, če bi ozračje absorbiralo vse IR sevanje. Avtor ugotavlja, da bi bila v tem primeru povprečna temperatura tal kar 24 °C in primerja sevalne razmere s tistimi, ki vladajo na Veneri. Je pa na Veneri gostota vpadlega energijskega toka dosti večja kot na Zemlji in je temu primerno višja tudi temperatura v njeni topli gredi.

10. UGOTOVITVE

V nalogi smo testirali energijski ravnovesni model s simulacijami koncentracije CO₂ z vrednostmi med 280 ppm in 1120 ppm pri dveh višinah ozračja: 15 km in 30 km nad tlemi. Z uporabljenim modelom, s katerim smo v nalogi raziskovali vpliv spremembe koncentracije CO₂ na prepustnost ozračja in povprečno temperaturo Zemlje ter približni potek temperature po zemeljskih širinskih pasovih, smo potrdili postavljene hipoteze:

- Kot prvi numerični primer smo analizirali rezultate prepustnosti ozračja v odvisnosti od koncentracije CO₂ dobljene s predpostavko, da se ozračje zaključi v višini 15 km nad zemeljskim površjem. Ugotovili smo, da bi v tem modelu znašala prepustnost ozračja v predindustrijskem času pri koncentraciji $C = 280$ ppm CO₂ približno 60% in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400$ ppm okoli 47%. Kljub relativno majhni višini ozračja presenečajo dokaj visoke vrednosti prepustnosti.
- Pri isti višini ozračja smo analizirali še rezultate za povprečno temperaturo Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO₂. Ugotavljamo, da bi znašala povprečna temperatura Zemlje pri koncentraciji $C = 280$ ppm 7,3 °C in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400$ ppm 11,4 °C, kar pomeni dobre 3 °C pod dejansko temperaturo. V tem modelu naj bi od predindustrijskega časa do danes narasla povprečna temperatura Zemlje za okoli 4 °C, kar občutno presega zanesljivo vrednost 1,1 °C, ki jo navaja strokovna literatura. Tudi temperaturna razlika med stanjem ozračja s koncentracijo 280 in 1120 ppm je relativno velika 8,6 °C.
- V drugem numeričnem primeru smo primerjali še rezultate simulacije z vrednostmi za prepustnost pri višini ozračja 30 km. Za prepustnost ozračja pri koncentraciji $C = 280$ ppm dobimo sedaj okoli 36% in pri današnjih pogojih, z ocenjeno vrednostjo koncentracije CO₂ $C \approx 400$ ppm, nekaj čez 22%, kar precej bolje ustreza satelitsko izmerjeni vrednosti slabih 30%, ki jo pri jasnem vremenu navaja strokovna literatura.
- S predpostavko, da se ozračje zaključi v višini 30 km nad zemeljskim površjem, smo analizirali še povprečno temperaturo Zemlje ob spremembah koncentracije. Ugotavljamo, da bi tokrat znašala povprečna temperatura Zemlje pri koncentraciji $C = 280$ ppm 11,4 °C in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400$ ppm pa 14,7 °C, kar se presenetljivo dobro ujema z referenčno vrednostjo med 14 in 15 °C, ki jo navajajo viri. V tem modelu naj bi od predindustrijskega časa do danes narasla povprečna temperatura Zemlje za okoli 3,4 °C, kar še vedno presega referenčno vrednost 1,1 °C. Temperaturna razlika med stanjem ozračja s koncentracijo 280 in 1120 ppm bi znašala sedaj sprejemljivih 7,1 °C.
- V vseh primerih smo z numerično analizo potrdili hipotezo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije CO₂ v ozračju in povečani absorpciji IR sevanja več povratnega dotoka energije, zaradi česar se poviša povprečna temperatura na površju Zemlje.

11. DRUŽBENA ODGOVORNOST

Podnebne spremembe, ki so posledica človeških aktivnosti se že dogajajo in bodo njihove posledice v prihodnosti vse hujše. Slovenija ima med državami Evropske unije eno najslabših podnebnih strategij, ki nikakor ni v skladu s sprejetimi cilji Pariškega podnebnega sporazuma (Dolinar in ostali, 2010, str. 2). Potrebno bi bilo sprejeti nove, bolj ambiciozne podnebne in okoljske načrte, ki bi bili v dolgoročnem interesu prebivalcev Slovenije in vsega sveta. V vsakem primeru pa bi bilo nujno uvesti nekaj pglavitnih ukrepov:

- spodbuditi manjšo porabo energije in pričeti z vlaganji v brezogljčno energetsko infrastrukturo,
- prizadevati si za večjo varčnost in spremembo ustaljenih navad (potovalnih, potrošniških in prehranskih),
- spodbuditi večjo uporabo javnih prevoznih sredstev, zagotoviti višje subvencije za javni prevoz in začeti pospešeno vlagati v železniško infrastrukturo,
- z zeleno davčno reformo uvesti davek na ogljik in prihodke od davka vračati državljanom kot dividende in
- ne navsezadnje uvesti podnebno problematiko v obvezen del učnih programov na vseh ravneh izobraževanja.



Slika 21: Trije kraji v Sloveniji ob koncu 21. stoletja po najbolj pesimističnem scenariju na podlagi rezultatov podnebnih modelov evropskega projekta EURO-CORDEX (vir: slike z razstave Slovenija 50+, ki jo je leta 2011 pripravila nevladna organizacija Umanotera)

Navedli smo le nekaj možnih ukrepov, za katere verjamemo, da bi pripomogli k reševanju podnebne in okoljske krize. Kaj se bo v prihodnosti dogajalo s podnebjem, je zelo odvisno od socialno-ekonomskega razvoja sveta. Zaključimo polemiko o podnebnih spremembah s srhljivo sliko treh krajev v Sloveniji ob koncu 21. stoletja po najbolj pesimističnem scenariju, ki so ga izdelali na podlagi rezultatov podnebnih modelov evropskega projekta EURO-CORDEX. Uporabljeni so bili rezultati 6 regionalnih podnebnih modelov, ki so, zgodovinsko gledano, najboljše simulirali podnebne razmere na območju Slovenije.

11. ZAKLJUČEK

Ko smo pred dobrima dvema letoma začeli poglobljeno razmišljati o globalnem segrevanju ozračja, smo imeli predvsem v mislih, kako s preprostim eksperimentom to znanstveno dokazano dejstvo tudi potrditi. Prve eksperimente smo z nabavljeno opremo izvajali s plinom butanom in kasneje pričeli razmišljati, da bi poskuse ponovili še s katerim od toplogrednih plinov. Med toplogrednimi plini, ki močno absorbirajo elektromagnetno valovanje z večjimi valovnimi dolžinami in igrajo ključno vlogo v energijski bilanci Zemlje, se nam je zdelo smiselno osredotočiti se na prispevek CO₂.

Tako smo začeli raziskovati ozračje, ki je zagotovo najbolj nestabilen in nenehno spreminjajoči se del podnebne sistema. Izbrali smo dokaj preprost podnebni model, s pomočjo katerega smo začeli ugotavljati vpliv podnebnih dejavnikov, kot so sončno sevanje, učinek spremembe koncentracije CO₂ in odbojnost tal na povprečno temperaturo Zemlje ter približni potek temperature po zemeljskih širinskih pasovih. Z izbiro energijskega ravnovesnega modela smo ves čas dajali poudarek učinku tople grede in razlagi z njim povezanih sprememb povprečne temperature na Zemlji. Na podlagi podnebne modela sevalne bilance smo izdelali računalniški algoritem, ki upošteva kratkovalovno sevanje Sonca, dolgovalovno sevanje Zemlje, vpliv ozračja ter prenos toplote po zemeljskih širinskih pasovih.

Zavedamo se, da smo v nalogi realne razmere v ozračju precej poenostavili. Poudariti je treba, da smo v poenostavljenem modelu zanemarili kar nekaj pomembnih prispevkov, kot npr. latentno toploto (energija, potrebna za evaporacijo tal) in zaznavno toploto (izmenjava toplote s turbulenco oz. konvekcijo), absorpcijo sončnega sevanja v ozračju itd., ki jih sodobni podnebni modeli, kot npr. globalni cirkulacijski modeli, seveda upoštevajo.

Seveda bi bilo povsem nesmiselno in celo naivno primerjati rezultate naših simulacij z rezultati tridimenzionalnih modelov, ki jih danes zaganjajo v velikih znanstvenih središčih, kjer uporabljajo močne superračunalnike in porabijo za to na stotine ur. Smo pa vendarle s preprostimi numeričnimi simulacijami potrdili hipotezo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije CO₂ več atmosferskega IR sevanja, kar posledično vpliva na povišanje povprečne temperature na površju Zemlje. Najdejo pa se v znanosti o podnebnih spremembah tudi skeptiki, kot je npr. profesor S. Fred Singer z Univerze v Virginiji, ki v svojih teorijah razlagajo, da podnebne spremembe niso posledica človeških dejanj, ampak gre za povsem naravni cikel.

Neizpodbitno je dejstvo, da podnebnim spremembam ne moremo več ubežati, so dejstvo sedanosti in še večja grožnja prihodnosti. Navkljub mnogim črnim napovedim pa še vedno lahko vplivamo na to, kako izrazite bodo spremembe v prihodnosti ter kako se bomo nanje prilagodili. Zato predstavljajo podnebne spremembe hkrati z grožnjo tudi izziv. Izziv za znanost, politiko, gospodarstvo in izziv za vsakega izmed nas.

12. VIRI IN LITERATURA

- [1] Bergant, K., "Podnebje v prihodnosti-koliko vemo o njem?," Okolje se spreminja (elektronski vir): podnebna spremenljivost in njen vpliv na vodno okolje. Ljubljana: Ministrstvo za okolje in prostor; Agencija republike Slovenije za okolje, 2010.
- [2] Budyko, M., I., "The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth," *Tellus* 21, pp. 611–619, 1969.
- [3] Davidson, M., W., "Tungsten-Halogen Incandescent Lamps," *Carl Zeiss Microscopy Online Campus*, National High Magnetic Field Laboratory, The Florida State University, Florida, 10 str.. Dosegljivo na svetovnem spletu:
<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/print/lightsources/tungstenhalogen-print.html>
- [4] Dolinar, M., R. Bertalanč, R., M. Demšar, D. Dvoršek, M. Nadbath, B. Pavčič, M. Roethel-Kovač, G. Vertačnik, Z. Vičar, "Spremenljivost podnebja v Sloveniji," Ljubljana, 2010, Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, 12 str. Dosegljivo na svetovnem spletu:
<http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/spremenljivost%20podnebja.pdf>
- [5] Dolinar, M., R., "Podnebne spremembe," Agencija RS za okolje, 37 str, 2018 Dosegljivo na svetovnem spletu:
http://ekosola.si/wpcontent/uploads/2018/11/PS_Ekosola_S%C5%A0_DOLINAR.pdf
- [6] Grobljar, U., "Absorpcija svetlobe vidnega in UV dela spektra v vodi," Diplomsko delo, Pedagoška fakulteta, Univerza v Ljubljani, 2017.
- [7] Kajfež-Bogataj, L., "Podnebne spremembe - trenutno razumevanje stanja," Slovensko meterološko društvo, Agencija RS za okolje, 2010. Dosegljivo na svetovnem spletu:
http://www.smd.vizdelavi.si/scripts/download.php?file/data/upload/Lucka_DMS_ARS_O_16_11_10.pdf
- [8] Makarovič, M. 2005. Priročnik programskega paketa Scilab za uporabnika začetnika. Pridobljeno s:
<http://dsc.ijs.si/damir.vrancic/fl/Scilab/prirocnik%20za%20uporabnika%20zacetnika%202005.pdf>
- [9] Margan, E., "Planckov zakon sevanja, Izračun gostote moči sončnega sevalnega spektra," Oddelek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev, Institut Jožef Stefan, Ljubljana, 2019. Dosegljivo na svetovnem spletu:
http://www-f9.ijs.si/~margan/CO2/Planckov_zakon_sevanja.html
- [10] McGuffie, K., Henderson-Sellers, A., "A Climate Modelling Primer, Third Edition," John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-85750-1 (HB); 0-470-85751-X (PB), 2005.
- [11] Rakovec, J., Žagar, "Kaj vse za potrebe napovedovanja in opazovanja vremena in klime merimo s satelitov," Raziskave s področja geodezije in geofizike: Zbornik predavanj, Str. 69–78, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2011. Dostopno na:
http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2011/SZGG_2011_Rakovec_Zagar.pdf
- [12] Rising Global Temperatures and CO₂, Climate Central. *Researching and reporting the science and impacts of climate change*, 2018. Dostopno na:
<https://www.climatecentral.org/gallery/graphics/co2-and-rising-global-temperatures>

- [13] Schmittner, A., "Climate Modeling," From Concepts to Codes, College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University, 63 str., 2013.
- [14] "Stališča SMD o podnebnih spremembah," *Vetrnica: glasilo Slovenskega meteorološkega društva*, Str. 4–29, 2011. Dosegljivo na svetovnem spletu: http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/Vetrnica_311_pod_drobnogledom.pdf
- [15] Strnad, J., "Fizika," II. del, Električna, Optika, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Ljubljana, 1973.
- [16] Šterman, N., "Segrevanje komor pod različnimi barvnimi filtri," Seminar, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, 2013.
- [17] Vidav, I., "Višja matematika III," Državna založba Slovenije, Ljubljana, 1976.
- [18] Vlahović, Ž., "Učinek spremembe vodne pare na sevalni prispevek toplogrednih plinov," Povzetek magistrskega dela, University of Reading, 2018, Dosegljivo na svetovnem spletu: http://www.meteo-drustvo.si/data/upload/Studentski_koticek_11_2018.pdf
- [19] Vrhovec, T., "Učinek tople grede in vroče poletje," *Presek; List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje*, Letnik 28, Številka 6, Str. 332–340, DMFA, Ljubljana, 2001.
- [20] Urbančič, I., "Infrardeče tehnologije," Seminar: Izbrana poglavja iz uporabne fizike, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, 2008.
- [21] Žagar, N., Rakovec, J., Skok, G., Honzak, L., "Izzivi regionalnega klimatskega modeliranja," Raziskave s področja geodezije in geofizike: Zbornik predavanj, Str. 69–85, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2011.

UPORABLJENI SIMBOLI IN OZNAKE

Latinski simboli

Enota

A	toplogredni parameter	$[\text{W/m}^2]$
A'	oznaka v enačbi (53)	$[-]$
a	albedo	$[-]$
$\vec{a}$	vektor v enačbi (43)	$[-]$
a_0	koeficient v enačbi (72)	$[-]$
a_1	koeficient v enačbi (72)	$[-]$
a_m	koeficienti v aproksimacijski funkciji	$[-]$
B	toplogredni parameter	$[\text{W/Km}^2]$
B'	oznaka v enačbi (53)	$[-]$
b	parameter v enačbi (50)	$[-]$
b	koeficient v enačbi (66)	$[\text{1/ppm}]$
$\vec{b}$	vektor v enačbi (43)	$[-]$
C	koncentracija	$[\text{ppm}]$
C_0	referenčna koncentracija	$[\text{ppm}]$
C^*	toplotna kapaciteta	$[\text{J/K}]$
c	parameter v enačbi (66)	$[\text{mV}]$
c_p	specifična toplota pri stalnem tlaku	$[\text{J/kg K}]$
d	dolžina absorpcijske komore	$[\text{m}]$
F	vsota kvadratov odstopov merjenih vrednosti	
	od vrednosti aproksimacijske funkcije	$[-]$
F_i	gostota energijskega toka iz i-tega pasu v sosednji pas	$[\text{W/m}^2]$
F_0	empirična konstanta v enačbi (31)	$[\text{W/m}^2]$
ΔF	sevalni prispevek	$[\text{W/m}^2]$
f	poljubna funkcija	$[-]$
f_i	porazdelitev vpadnega sevanja v i-tem pasu	$[-]$
g	toplogredni parameter odvisen od prepustnosti	$[-]$
$\tilde{g}$	aproksimacijska funkcija	$[-]$
h	višina ozračja	$[\text{m}]$
i	sumacijski indeks	$[-]$
i	številka širinskega pasu	$[-]$
j	iteracijski korak	$[-]$
j	gostota energijskega toka	$[\text{W/m}^2]$
j_{ozr}	gostota energijskega toka ozračja	$[\text{W/m}^2]$
j_{tal}	gostota energijskega toka tal	$[\text{W/m}^2]$
K	transportni koeficient	$[\text{W/m}^2\text{K}]$
N_c	število molekul CO_2	$[-]$
N_z	število molekul zraka	$[-]$
n	število širinskih pasov	$[-]$

p	tlak	[Pa]
R_i	empirični parameter	[W/m ²]
r_0	polmer balončka	[m]
S	matrika reda $m+1$	[-]
S	površina	[m ²]
T	temperatura	[K]
T_e	efektivna temperatura	[K]
T_i	temperatura v i -tem širinskem pasu	[K]
$T_i^{(0)}$	začetna temperatura v i -tem pasu	[K]
$T_i^{(j)}$	temperatura v i -tem pasu na j -tem iteracijskem koraku	[K]
T_{kr}	kritična temperatura	[K]
T_{ozr}	temperatura ozračja	[K]
T_{tal}	temperatura tal	[K]
T'	povišanje temperature zaradi motnje	[K]
$\bar{T}$	povprečna temperatura Zemlje	[K]
T_0	referenčna temperatura	[K]
t	čas	[s]
U	napetost termočlena	[V]
V	prostornina	[m ³]
X	oznaka v enačbi (53)	[-]
x	kartezijska koordinata	[-]
Y	oznaka v enačbi (53)	[-]
y	kartezijska koordinata	[-]

Grški simboli

Enota

α	podnebna občutljivost	[m ² K/W]
Δ	diferenca	[-]
ε	emisivnost	[-]
λ	valovna dolžina	[m]
ν	frekvenca	[1/s]
π	število pi, $\pi = 3,14159$	[-]
ρ	masna gostota	[kg/m ³]
τ	prepustnost	[-]
φ_i	geografska širina danega pasu	[°]
μ	absorpcijski koeficient	[1/m]

Konstante

Boltzmannova konstanta	$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
polmer Zemlje	$R = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$
solarna konstanta	$j_0 = 1370 \text{ W/m}^2$
Stefan-Boltzmannova konstanta	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
težni pospešek	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
Wienova konstanta	$k_W = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$

Uporabljene kratice in simboli

CO ₂	ogljikov dioksid
IPPC	Medvladni forum o podnebnih spremembah
IR	infrardeče

PRILOGA

K raziskovalni nalogi je priložen program, s katerim smo računali potek temperature po posameznih širinskih pasovih in globalno temperaturo Zemljinega površja.

Oznake uporabljene v programu Scilab:

A	empirična konstanta, ki opiše učinek tople grede za CO ₂ in vodno paro
alfa	albedo
B	empirična konstanta, ki opiše učinek tople grede za CO ₂ in vodno paro
Fi	zemljepisna širina pasu
fi	razporeditev sončnega vpadnega sevanja
i	številka širinskega pasu
K	toplogredni transportni koeficient
k	odstopanje
S0	solarna konstanta
Ti	temperatura v i-tem širinskem pasu
Tkr	kritična temperatura
Tnova	nova temperatura
Tstara	stara temperatura

//1D PODNEBNI MODEL SEVALNE BILANCE

//Fi-zemljepisna širina pasu

//fi-razporeditev sončnega vpadnega sevanja

//Ti-temperatura v i-tem pasu

//i-stevilka pasu

S0=1370 //solarna konstanta

A=204 //konstanta toplogrednega učinka (CO₂, vodna para)

B=2.17 //konstanta toplogrednega učinka (CO₂, vodna para)

K=3.81 //transportni koeficient po K. Budyko

n=9 //število vrstic enostolpčne matrike

//Kritična temperatura in albedo

Tkr=-10 //kritična temperatura

alfa=0.3 //albedo za Ti>Tkr

alfa=0.6 //albedo za Ti<Tkr

//matrika zemljepisnih širin Fi

Fi = [85;75;65;55;45;35;25;15;5]

//vektor porazdelitve sončnega vpadnega sevanja

fi = [0.5;0.531;0.624;0.770;0.892;1.021;1.120;1.189;1.219]

//vektor temperatur po posameznih pasovih

Ti = [0;0;0;0;0;0;0;0;0]

//začetni približek temperatur

Tstara = [-15;-15;-5;5;10;15;18;22;24]

// rezerviramo spomin za Tnova

Tnova=zeros(n,1)

//Odstopanje od rezultata za zaustavitveni kriterij

```
odstopek=0.001
//začetno število za zaustavitveni krterij
k=0
Razlika=odstopek+1

vsotaS=0 //vsota v ulomku spodaj (imenovalec)
for j=1:n
    vsotaS=vsotaS+(cos(Fi(j)*(%pi/180))) //izraz v imenovalcu
end

//zanka while (ponavlja, dokler se ne zgodi eno ali drugo)
while (Razlika>odstopek & k<100)
    k=k+1 //vsakic povecaj k za 1
    vsotaZ=0 //vsota v ulomku zgoraj (števec)
    for j=1:n
        vsotaZ=vsotaZ+(Tstara(j)*cos(Fi(j)*(%pi/180))) //izraz v stevcu
    end

    for i=1:n
        if Tstara(i)>Tkr then //pogojni stavek za izbiro kriticne temperature
            alfa=0.3 //vrednost za albedo nad kriticno temperaturo
        else
            alfa=0.6 //vrednost za albedo pod kriticno temperaturo
        end
        Tnova(i)=(1/(B+K))*((S0/4)*(1-alfa)*fi(i)-A+K*(vsotaZ/vsotaS))
    end
    Razlika=0
    for i=1:n
        Razlika=Razlika+abs(Tnova(i)-Tstara(i))
    end
    Razlika=Razlika/n
    disp(Razlika)
    Tstara=Tnova //postaraj Tnova
end

vsota1=0
for i=1:n
    vsota1=vsota1+Tnova(i)*cos(Fi(i)*%pi/180)
end
vsota2=0
for i=1:n
    vsota2=vsota2+cos(Fi(i)*%pi/180)
end
povpZ=vsota1/vsota2

printf("Temperature po pasovih: ") //izpis stavka
disp(Tnova) //prikaz vrednosti vektorja temperatur po pasovih
printf("Povprečna temperatura na Zemlji znaša: " + string(povpZ)+" °C")
```