



**54. srečanje mladih raziskovalcev
Slovenije 2020**

Vpliv koncentracije ogljikovega dioksida v ozračju na toplotno bilanco Zemlje

**FIZIKA
RAZISKOVALNA NALOGA**

Področje: FIZIKA

Avtorica: IZA NOVAK

Mentorja: dr. PETER CRNJAC

mag. TADEJ CRNJAC

Šola: II. GIMNAZIJA MARIBOR

Maribor, 2020

KAZALO VSEBINE

KAZALO PREGLEDNIC.....	3
KAZALO GRAFOV	3
KAZALO SLIK.....	4
ZAHVALA	5
POVZETEK.....	6
1. UVOD.....	7
1.1 Opredelitev problema	7
1.2 Namen in cilji raziskovalne naloge.....	8
1.3 Metode raziskovanja	8
2. TEORETIČNO OZADJE.....	9
2.1 Podnebni sistem.....	9
2.2 Absorpcija elektromagnetnega valovanja, Beer-Lambertov zakon	9
2.3 Spekter sončnega sevanja	10
2.4 Učinek tople grede	11
2.4 Absorpcija toplogrednih plinov v ozračju	12
3. PODNEBNI MODELI	14
3.1 Energijski ravnovesni model	15
3.2 Linearizacija dolgovalovnega sevanja Zemlje	17
3.3 Enodimenzionalni model sevalne bilance	17
3.4 Diskretizacija vodilne enačbe enodimenzionalnega modela	19
3.5 Sprememba energijske bilance Zemlje	19
4. TEORETIČNE NAPOVEDI UPORABLJENEGA MODELA.....	21
4.1 Sevalni prispevek ogljikovega dioksida.....	21
5. MATEMATIČNA FORMULACIJA PROBLEMA	23
5.1 Aproksimacija funkcij.....	23
5.2 Metoda najmanjših kvadratov	23
5.3 Konstrukcija empiričnih formul	24
6. EKSPERIMENTALNI DEL.....	26
6.1 Uporabljena eksperimentalna oprema	26
6.2 Merjenje prepustnosti vzorcev za sončno in dolgovalovno sevanje	27
6.3 Potek meritev	28
6.4 Rezultati meritev	30

6.5 Grafični prikaz rezultatov meritev	31
7. OBDELAVA REZULTATOV MERITEV	33
7.1 Linearna aproksimacijska funkcija	33
7.2 Določanje prepustnosti ozračja	34
7.3 Numerični algoritem	34
7.4 Preverjanje pravilnosti numeričnega algoritma	35
8. ANALIZA IN DISKUSIJA	36
8.1 Toplogredna parametra A in B	36
8.2 Konvergenca rešitve in vpliv začetnih pogojev	37
8.3 Vpliv koncentracije CO_2 na prepustnost ozračja	38
8.4 Vpliv koncentracije CO_2 na povprečno temperaturo Zemlje	40
9. UGOTOVITVE	42
11. UPORABNA VREDNOST OPRAVLJENIH RAZISKAV	43
11. ZAKLJUČEK	44
12. VIRI IN LITERATURA	45
UPORABLJENI SIMBOLI IN OZNAKE	47
PRILOGA	50

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Uporabljeni podatki	19
Preglednica 2: Rezultati meritev	31
Preglednica 3: Temperature po širinskih pasovih in povprečna temperatura Zemlje	35
Preglednica 4: Temperature po pasovih in povprečna temperatura Zemlje pri različnih vrednostih albeda.	35
Preglednica 5: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 15 km.	37
Preglednica 6: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 30 km.	37
Preglednica 7: Število iteracij pri različno izbranih začetnih temperaturah.	38
Preglednica 8: Temperature po posameznih širinskih pasovih pri višini ozračja 30 km.	41

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Krivulja za napetost termočlena U' , v odvisnosti od koncentracije.	32
Graf 2: Razlika dveh zaporednih približkov v odvisnosti od števila iteracij.	38
Graf 3: Prepustnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 15 km.	39
Graf 4: Prepustnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.	39
Graf 5: Povprečna temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 15 km.	40

Graf 6: Povprečna temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO ₂ pri višini ozračja 30 km.....	41
--	----

KAZALO SLIK

Slika 1: Dejavniki, prepletenost in spremenljivost podnebne sistema.....	9
Slika 2: Spekter sončne svetlobe.....	11
Slika 3: Ravnovesje podnebne sistema.....	12
Slika 4: Absorpcijski koeficient vodne pare in CO ₂ v odvisnosti od valovne dolžine.	12
Slika 5: Prikaz sevalnega spektra površja Zemlje pri različnih temperaturah.	13
Slika 6: Toplota, ki jo Zemlja absorbira in seva.....	15
Slika 7: Triplastni model vesolja, ozračja in tal.....	16
Slika 8: Enodimenzionalni podnebni model.	18
Slika 9: Globalno segrevanje ozračja pri eksponentnem naraščanju koncentracije CO ₂	22
Slika 10: Pripomočki, uporabljeni pri eksperimentu.....	26
Slika 11: Spekter izsevane svetlobe volframove halogene žarnice.....	27
Slika 12: Namestitev naprav za izvedbo poskusa.	28
Slika 13: Vertikalna namestitev naprav za izvedbo poskusa.	29
Slika 14: Merjenje prostornine zmesi s pomočjo balona.	29
Slika 15: Izpraznitev balona v absorpcijsko komoro.....	30
Slika 16: Napetost termočlena za čisti CO ₂ , zmes1, zmes2 in zmes3 v odv. od časa	31

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju dr. Petru Crnjacu za pomoč in podporo pri raziskovanju in pisanju naloge, mag. Tadeju Crnjacu za pomoč pri programiranju in dr. Marku Jagodiču za pomoč pri izvedbi eksperimenta.

POVZETEK

V nalogi smo raziskovali ozračje, ki je zagotovo najbolj nestabilen in nenehno spreminjajoči se del podnebne sistema. Med toplogrednimi plini, ki močno absorbirajo elektromagnetno valovanje z daljšimi valovnimi dolžinami in igrajo ključno vlogo v energijski bilanci Zemlje, smo se izključno osredotočili le na prispevek ogljikovega dioksida.

V nalogi predpostavljamo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije ogljikovega dioksida v ozračju in povečani absorpciji infrardečega sevanja več povratnega dotoka energije, kar naj bi vplivalo na povišanje povprečne temperature na površju Zemlje. Za potrditev te hipoteze smo izdelali enodimenzionalni triplastni podnebni model, s pomočjo katerega smo ugotavljali vpliv podnebnih dejavnikov, kot so kratkovalovno sevanje Sonca, toplotno sevanje Zemlje in odbojnost tal ter raziskovali vpliv spremembe koncentracije ogljikovega dioksida na prepustnost ozračja in povprečno temperaturo Zemlje. Zaradi kompleksnosti reševanja iteracijske funkcije podnebne modela smo za numerično rešitev uporabili računalniški program 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. Z analitično metodo smo analizirali rezultate modeliranja, jih primerjali z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati, ki so dosegljivi v strokovni literaturi in potrdili zastavljene cilje naloge. Izsledke in eksperimentalni del naloge bodo v prihodnjem šolskem letu začeli izvajati kot demonstracijski poskus v sklopu obveznega učnega načrta za fiziko v programu mednarodne mature.

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 si pogosto nasprotujoča. Človek na mnoge dejavnike, ki povzročajo podnebne spremembe, nima vpliva. Znanstveno dokazano je 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)

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. 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).

1.1 Opredelitev problema

Podnevi prodrejo sončni žarki skozi ozračje in segrejejo tla. Triatomni plini v ozračju ne vplivajo na prehod vidnega dela tega sevanja, absorbirajo pa dele infrardečega (IR) sončnega sevanja, zaradi česar se segrevajo posamezne plasti ozračja. Del vpadnega sončnega sevanja se odbije od oblakov, del se ga odbije od površja Zemlje, del pa ga površje absorbira. Ker je temperatura tal približno med 250 in 300 K, oddajajo po Planckovem zakonu toploto pretežno kot IR sevanje. Del tega dolgovalovnega sevanja se v ozračju absorbira, hkrati pa tudi ozračje IR seva. Nekaj tega sevanja se izgubi v vesolje, nekaj pa se ga vrne nazaj na zemeljsko površje. Kot povzamemo iz literature (Vrhovec, 2001, str. 334), je prenos energije z IR sevanjem odvisen od vrste in koncentracije sestavin v ozračju.

V IR delu spektra je vodna para najpomembnejši absorber in sevalec, saj prispeva okoli 70% vsega IR sevanja, ki pride iz ozračja. Vendar je globalno gledano vpliv vodne pare ves čas približno enak, čeprav bi pričakovali, da se bo, zaradi povečane količine vlage v zraku, ki je posledica povečanega izhlapevanja pri višji temperaturi, povečalo tudi sevanje vodne pare. Pomemben sevalec v IR delu spektra je tudi triatomni ogljikov dioksid (CO_2). V naravnem ravnovesju je količina CO_2 , ki kroži med tlemi, ozračjem in rastlinstvom, zelo velika, človeška aktivnost pa k temu prispeva le majhen neuravnoteženi del (Vrhovec, 2001, str. 333).

Koncentracije CO_2 , 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 CO_2 v vsem ozračju povečala za več kot 40%. Povečevanje koncentracije CO_2 pa ima dva glavna učinka: prepustnost ozračja se manjša in plast z največjim izsevom dolgovalovnega sevanja ozračja je vse višje (Kajfež-Bogataj, 2010, str. 5).

1.2 Namen in cilji raziskovalne naloge

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 $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Dolinar in ostali, 2010, str. 2). Kot izziv smo v nalogi skušali poiskati odgovor na vprašanje, ali je z razpoložljivim srednješolskim znanjem fizike, matematike in računalništva moč dobiti rezultate, ki bi predstavljali vsaj smiselne približke za vrednosti, ki jih dajejo sodobni podnebni modeli. Med plini v ozračju, ki močno absorbirajo elektromagnetno valovanje z daljšimi valovnimi dolžinami in igrajo ključno vlogo v energijski bilanci Zemlje, smo se izključno osredotočili le na prispevek CO_2 .

V nalogi predpostavljamo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije CO_2 v ozračju in povečani absorpciji IR sevanja več povratnega dotoka energije, kar naj bi vplivalo na povišanje povprečne temperature na površju Zemlje. Za potrditev te hipoteze smo izdelali enodimenzionalni triplastni podnebni model, s pomočjo katerega smo ugotavljali vpliv podnebnih dejavnikov, kot so kratkovalovno sevanje Sonca, toplotno sevanje Zemlje in odbojnost tal ter raziskovali vpliv spremembe koncentracije CO_2 na prepustnost ozračja in povprečno temperaturo Zemlje. Na koncu smo rezultate numeričnega modeliranja analizirali in primerjali z referenčnimi vrednostmi, ki so dostopne v strokovni literaturi.

1.3 Metode raziskovanja

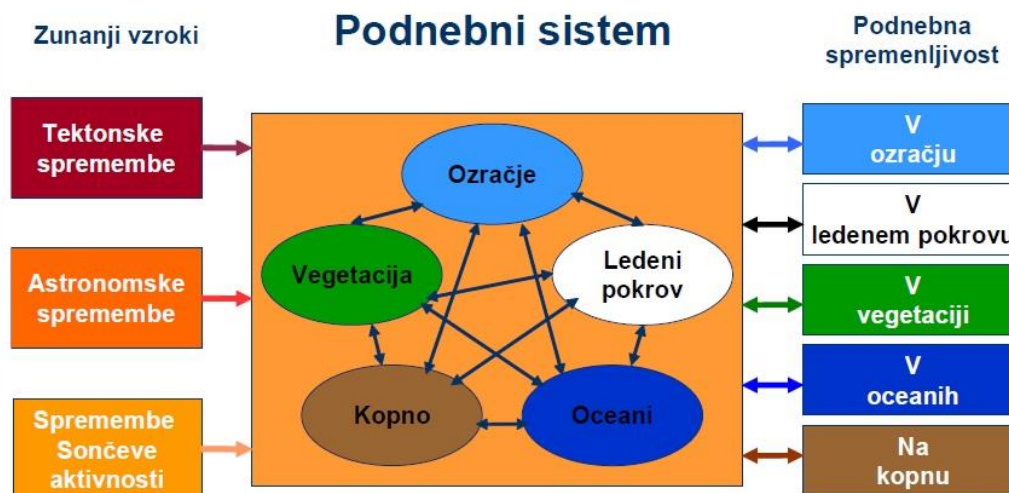
V teoretičnem delu naloge smo se opirali na teoretična spoznanja sodobne klimatologije, ki smo jih pridobili pri študiju tuje in domače literature, torej z analitično-metodološkim pristopom. V empiričnem delu smo pridobljeno teoretično znanje uporabili pri numeričnem modeliranju, kjer smo za numerično rešitev problema uporabili računalniški program Scilab. Z analitično metodo smo analizirali rezultate modeliranja in jih primerjali z eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati, ki so dosegljivi v strokovni literaturi. Pri tem smo se v glavnem sklicevali na študijo sevalnega prispevka CO_2 (Schmittner, 2013, str.11), pri kateri so z modeli splošne cirkulacije simulirali idealiziran numerični eksperiment, pri katerem so spremljali večanje koncentracije CO_2 za 1% na leto, od leta 1850 z referenčno vrednostjo 280 ppm^1 do leta 1990, ko bi naj koncentracija narasla na 1120 ppm .

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

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).



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

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).

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.

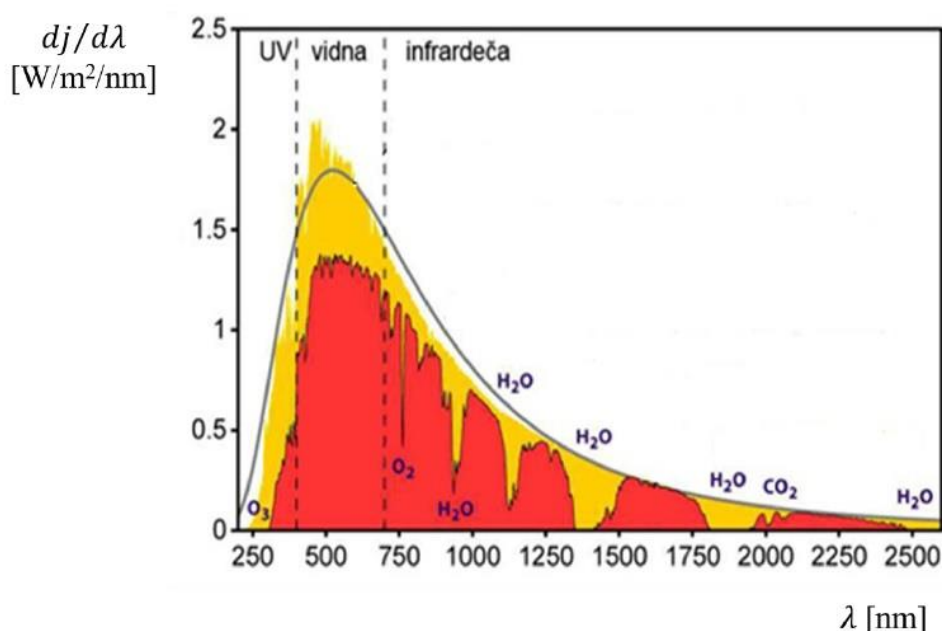
V naravi ni teles, ki bi bila "prozorna" ($\tau = 1$) po celotnem spektru valovnih dolžin. Tako npr. voda dobro prepušča vidno svetlobo (največja prepustnost pri valovni dolžini okoli 550 nm, za katero je človeško oko tudi najbolj občutljivo), precej slabše pa toplotne valove. Podobno je zrak skoraj 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/m^2 . 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 2 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.

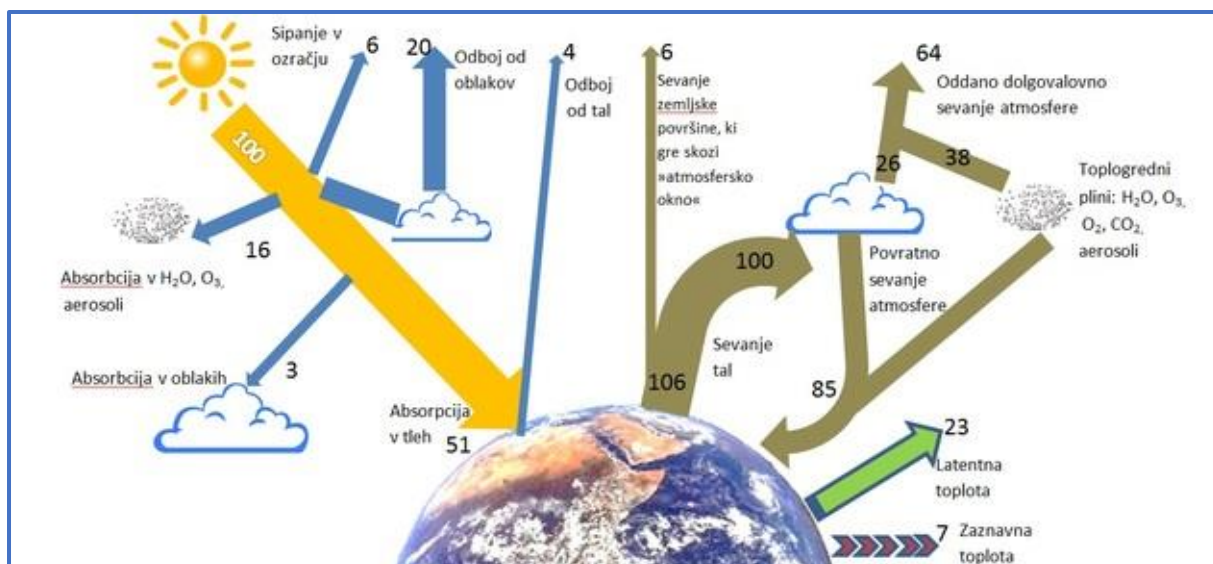


Slika 2: Spekter sončne svetlobe (vir: Šterman, 2013, str. 6).

2.4 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 3 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 vstopi v ozračje.

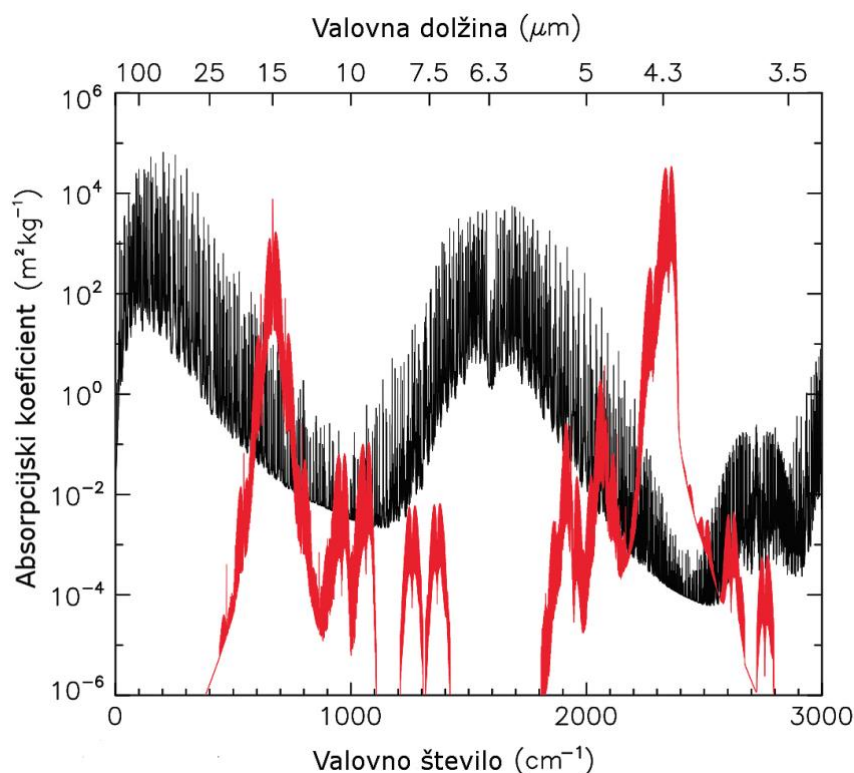
Segreto zemeljsko površje seva nazaj v ozračje IR svetlobo (396 W/m^2) pri daljših valovnih dolžinah, za katere pa je ozračje manj prepustno. Del tega sevanja namreč toplogredni plini v ozračju absorbirajo in nato ponovno izsevajo na vse strani, tudi nazaj proti zemeljskemu površju. Tako ostane del energije, 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. Seveda je povratno sevanje iz ozračja prisotno tudi podnevi, le da je tedaj vpliv sončnega sevanja bistveno močnejši (Vrhovec, 2001, str. 333).



Slika 3: Ravnovesje podnebne sistema (vir: Dolinar, 2018, str. 7).

2.4 Absorpcija toplogrednih plinov v ozračju

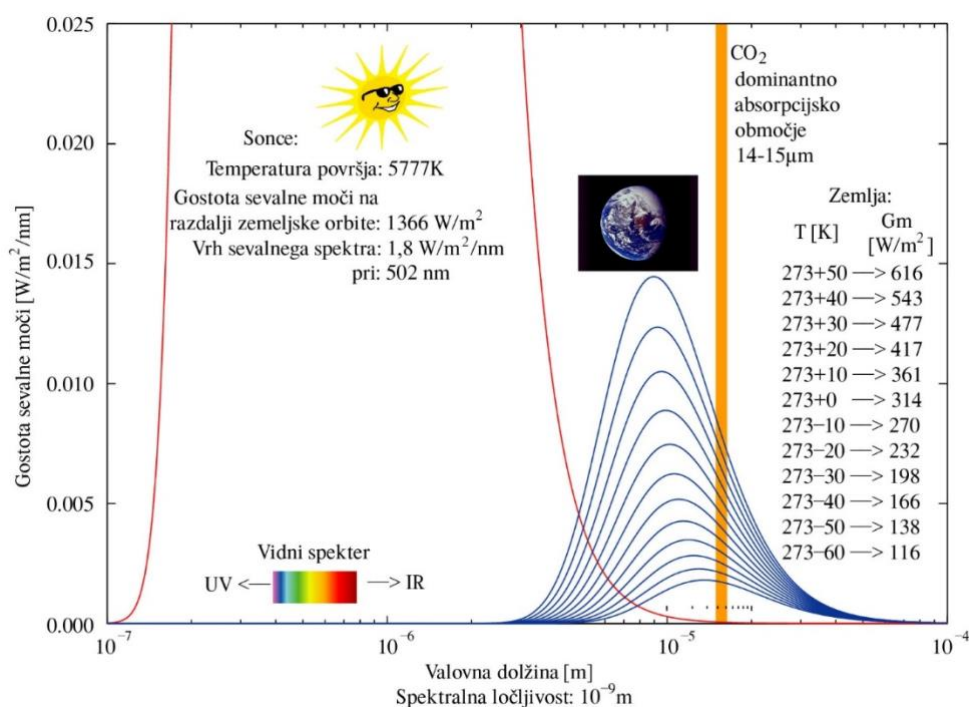
Večina plinov, ki sestavljajo zemeljsko ozračje absorbira toplotne valove, pri čemer molekule absorbirajo energijo z izbranimi valovnimi dolžinami in s tem določajo prepustnost ozračja. Na prehod elektromagnetnega valovanja skozi ozračje najbolj vpliva vodna para v oblakih, ki se v IR delu spektra obnašajo 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).



Slika 4: Absorpcijski koeficient vodne pare (črna) in CO_2 (rdeča) v odvisnosti od valovne dolžine (vir: Vlahović, 2018, str. 3).

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. Na sliki 4 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.

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 5, 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 5), ki leži med približno 14–15 μm valovne dolžine (Margan, 2019, str.1).



Slika 5: 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.

3. PODNEBNI MODELI

Podnebni modeli so računalniški programi, ki simulirajo ključne procese podnebnega 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.

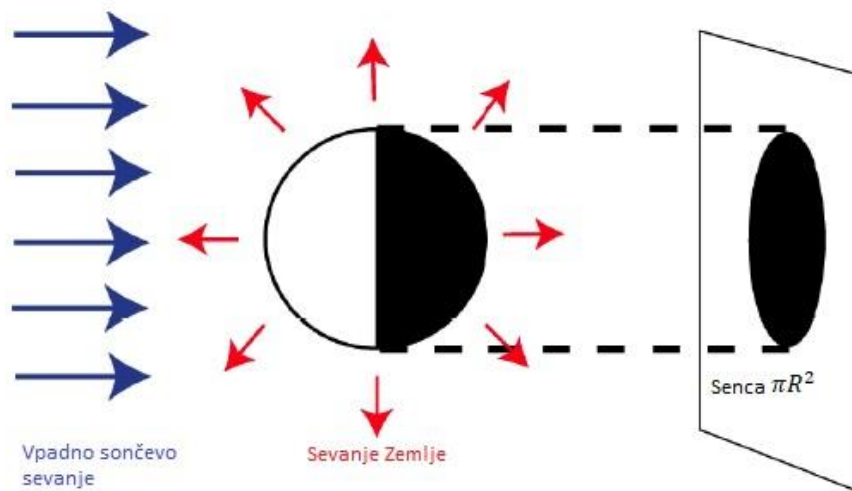
Čeprav uporabljajo zahtevnejši modeli zelo podobne kvantitativne metode za simulacijo interakcij med pomembnimi podnebnimi dejavniki, pa vseeno prihaja med njihovimi rezultati do opaznih razlik. Rezultati vseh pa nesporno kažejo, da narašča globalna temperatura zaradi naraščanja koncentracij toplogrednih 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 6. Predpostavimo, da je toplotni tok, ki prihaja iz notranjosti Zemlje proti površju mnogo manjši od sevalnih tokov in ga smemo zanemariti.



Slika 6: 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 sivega in črnega telesa enakih površin. Večina teles je sivih, kar pomeni, da telo del sevanja odbije.

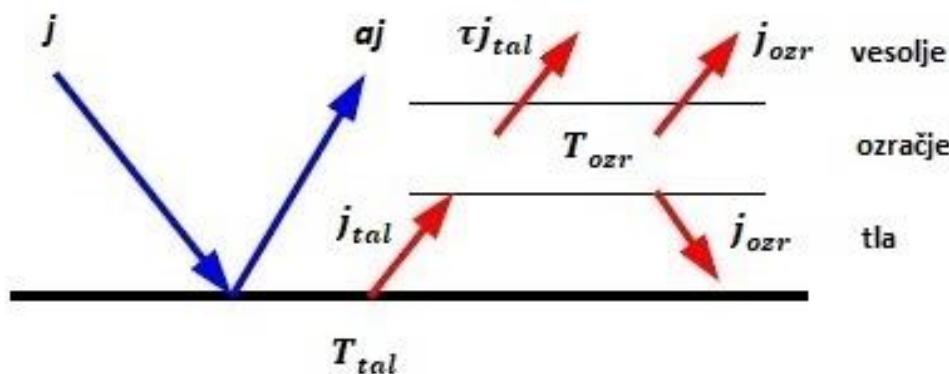
Dejanska temperatura na površju Zemlje je višja zaradi učinkov toplogrednih plinov. Vpliv učinka tople grede v ozračju na temperaturo na Zemlji ocenimo s pomočjo triplastnega modela, kjer poleg tal in vesolja upoštevamo še ozračje. V modelu predpostavimo, da ozračje v celoti prepušča sončno sevanje. Tla absorbirajo del sončnega sevanja, prejmejo polovico sevanja ozračja in tudi sama sevajo. Kot je ilustrirano na sliki 7 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 7: 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), ki navaja $\tau = 0,23$, kar pomeni $g = 0,615$, kot satelitsko izmerjeno vrednost prepustnosti⁵ pri pogojih, ki danes vladajo v ozračju. Z upoštevanjem Stefanovega zakona za črno telo (tla) dobimo iz enačbe (11)

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

⁵ 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.

kar veliko bolj ustreza dejanskim razmeram na Zemlji pri tleh kot rezultat prejšnjega izračuna. Po enačbi (10) izračunamo še temperaturo ozračja $T_{ozr} = 227 \text{ K} = -46 \text{ °C}$, 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 3. 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 3. 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

Modificirana gostota energijskega toka tal J_{tal} (11) je premo sorazmerna s T^4 , vendar lahko potenčno odvisnost v temperaturnem intervalu med približno 250 in 300 K aproksimiramo z linearno funkcijo $A + BT$ (McGuffie, 2005, str. 85). Najhitreje bomo opravili postopek linearizacije dolgovalovnega sevanja Zemlje tako, da J_{tal} razvijemo okoli spodnje vrednosti izbranega temperaturnega intervala T_0 v Taylorjevo vrsto

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

iz česar sledi po kratki preureditvi

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

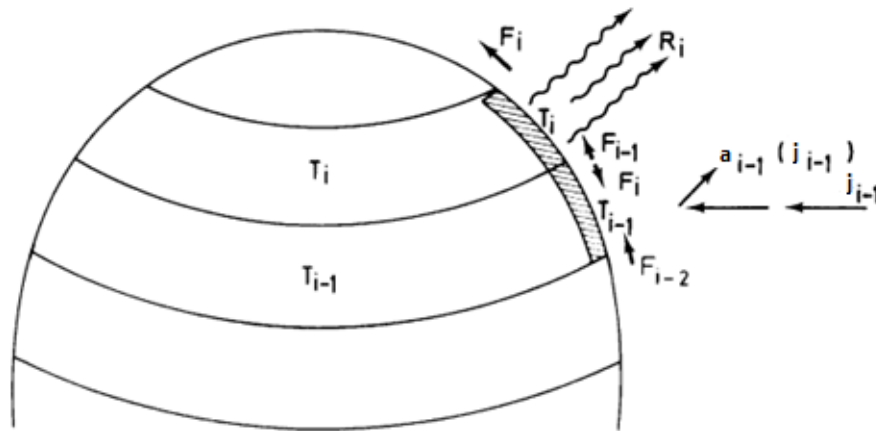
Z $A = -3g\sigma T_0^4$ in $B = 4g\sigma T_0^3$ smo označili empirična parametra, ki opišeta učinek tople grede in sta odvisna od temperature T_0 ter prepustnosti ozračja. Če podajamo temperaturo v $^{\circ}\text{C}$, se vrednost parametra B , ki predstavlja smerni koeficient premice, ne spremeni, medtem ko se vrednost parametra A spremeni zaradi vzporednega premika koordinatnega sistema. Ko vstavimo npr. $T_0 = 250 \text{ K}$, dobimo pri povprečni vrednosti prepustnosti zemeljskega ozračja $\tau = 0,23$ ($g = 0,615$) $A = -388,7 \text{ W/m}^2$ in $B = 2,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. Kadar podajamo temperaturo v $^{\circ}\text{C}$, potem znaša parameter $A = 204,0 \text{ W/m}^2$. Če vstavimo za T_0 temperaturo tal (288 K), dobimo $A = -726 \text{ W/m}^2$ in $B = 3,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ oz. vrednost parametra $A = 191,3 \text{ W/m}^2$, ko navajamo temperaturo v $^{\circ}\text{C}$.

3.3 Enodimenzionalni model sevalne bilance

V enodimenzionalnem modelu obravnavamo n različnih neodvisnih širinskih pasov, kot je prikazano na sliki 8. Za i -ti širinski pas uporabimo in dopolnimo enačbo (11)

$$(1 - a(T_i))j_i = R(T_i) + F(T_i) = A + BT_i + F_i, \quad (16)$$

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.



Slika 8: 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

$$F(T_i) = K(T_i - \bar{T}), \quad (17)$$

kjer predstavlja $\bar{T}$ povprečno globalno temperaturo Zemlje. 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)

$$j_i = \frac{j_0}{4} f(\varphi_i), \quad (18)$$

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 (17) in (18) vstavimo v enačbo (16) ter jo preuredimo, lahko izrazimo temperaturo i -tega širinskega pasu

$$T_i = \frac{1}{B + K} \left[\frac{j_0}{4} (1 - a_i) f_i - A + K\bar{T} \right]. \quad (19)$$

Na podlagi izračunanih temperatur po pasovih izračunamo povprečno temperaturo na Zemlji z upoštevanjem utežnih faktorjev $\cos \varphi_i / \sum_i \cos \varphi_i$ (McGuffie, 2005, str. 86)

$$\bar{T} = \frac{\sum_i T_i \cos \varphi_i}{\sum_i \cos \varphi_i}. \quad (20)$$

3.4 Diskretizacija vodilne enačbe enodimenzionalnega modela

Vsi členi enačbe (19) 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

$$a_i = \begin{cases} 0,3 & T_i > T_{kr} \\ 0,6 & T_i < T_{kr} \end{cases}, \quad (21)$$

kjer je T_{kr} temperatura na snežnem robu, z značilno vrednostjo med 0 °C in -10 °C. Zapišimo enačbo (19) v diskretni obliki, s pomočjo katere lahko izračunamo v enodimenzionalni geometriji približni potek temperature po posameznih pasovih

$$T_i^{(j+1)} = \frac{1}{B + K} \left[\frac{j_0}{4} (1 - a_i) f_i - A + K \frac{\sum_i T_i^{(j)} \cos \varphi_i}{\sum_i \cos \varphi_i} \right], \quad (22)$$

kjer je $T_i^{(j)}$ temperatura v i -tem pasu na j -tem iteracijskem koraku, ki jo podajamo v °C in φ_i zemljepisna širina. 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 (20).

Preglednica 1: 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

Enodimenzionalni model sevalne bilance bomo v nalogi uporabili za raziskavo vpliva koncentracije CO₂ na prepustnost ozračja in povprečno temperaturo Zemlje ter za računanje poteka temperatur po zemeljskih širinskih pasovih.

3.5 Sprememba energijske bilance Zemlje

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 izračunati časovno konstanto Zemlje, glede na spremembe v energijski bilanci, s preprosto fizikalno oceno.

Predpostavimo, da je ravnovesna temperatura Zemlje T_r npr. 288 K. Zaradi neke dovolj majhne zunanje motnje (perturbacije) naj se temperatura poveča na $T(t) = T_r + T'(t)$, zaradi česar se poveča delež dolgovalovnega sevanja. Zaradi oddanega toplotnega toka se Zemlja ohlaja. Uporabimo energijski izrek termodinamike in upoštevajmo, da je oddani toplotni tok razlika med kratkovalovnim sončnim sevanjem $(1 - a)j$ in dolgovalovnim sevanjem Zemlje $A + BT$

$$C^* \frac{dT'}{dt} = S[(1 - a(T_r + T'))j - A - B(T_r + T')] , \quad (23)$$

kjer smo s C^* pisali skupno toplotno kapaciteto Zemlje in z S njeno površino. Predpostavimo, da je motnja dovolj majhna $T' \ll T_r$ in da je $a(T_r + T') \approx a(T_r) = a_0$, pa se enačba (23) poenostavi

$$C^* \frac{dT'}{dt} = S[(1 - a_0)j - A - B(T_r + T')] \quad (24)$$

in zaradi (11) dokončno v

$$C^* \frac{dT'}{dt} = -SBT' . \quad (25)$$

Spremenljivki ločimo in dobimo preprosto diferencialno enačbo

$$\frac{dT'}{T'} = -\frac{SBdt}{C^*} , \quad (26)$$

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

$$T'(t) = T'(t = 0)e^{-\frac{SB}{C^*}t} , \quad (27)$$

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

$$C^* = C_{ozr}^* + C_{tal}^* + C_{oce}^* . \quad (28)$$

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

$$\begin{aligned} C_{ozr}^* &= c_{pozr} \rho_{ozr} S h_{ozr} = 1\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 8\,300 \text{ m} \cdot S \approx 10 \cdot 10^6 \cdot S \frac{\text{J}}{\text{Km}^2} , \\ C_{tal}^* &= c_{ptal} \rho_{tal} S h_{tal} = 2\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 4\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \text{ m} \cdot 0,3 S = 24 \cdot 10^6 \cdot S \frac{\text{J}}{\text{Km}^2} , \\ C_{oce}^* &= c_{poce} \rho_{oce} S h_{oce} = 4\,200 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 50 \text{ m} \cdot 0,7 S = 147 \cdot 10^6 \cdot S \frac{\text{J}}{\text{Km}^2} . \end{aligned} \quad (29)$$

Časovno konstanto lahko potem izračunamo kot

$$\frac{C^*}{SB} = \frac{(C_{ozr}^* + C_{tal}^* + C_{oce}^*)}{SB} \approx 5,4 \cdot 10^7 \text{ s} , \quad (30)$$

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.

4. TEORETIČNE NAPOVEDI UPORABLJENEGA MODELA

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 3.5, se globalna temperatura spremeni in deli podnebne sistema se morajo tem spremembam prilagoditi.

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. 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.

4.1 Sevalni prispevek ogljikovega dioksida

Povišano koncentracijo CO_2 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 CO_2 iz ozračja izloči s fotosintezo, delno pa ga iz ozračja vsrkajo oceani. Zaradi spremembe koncentracije CO_2 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 CO_2 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

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

Podnebno občutljivost določimo s predpostavko, da je planetarni albedo konstanten. Označimo ravnovesno temperaturo s T_r in uporabimo (24)

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

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

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

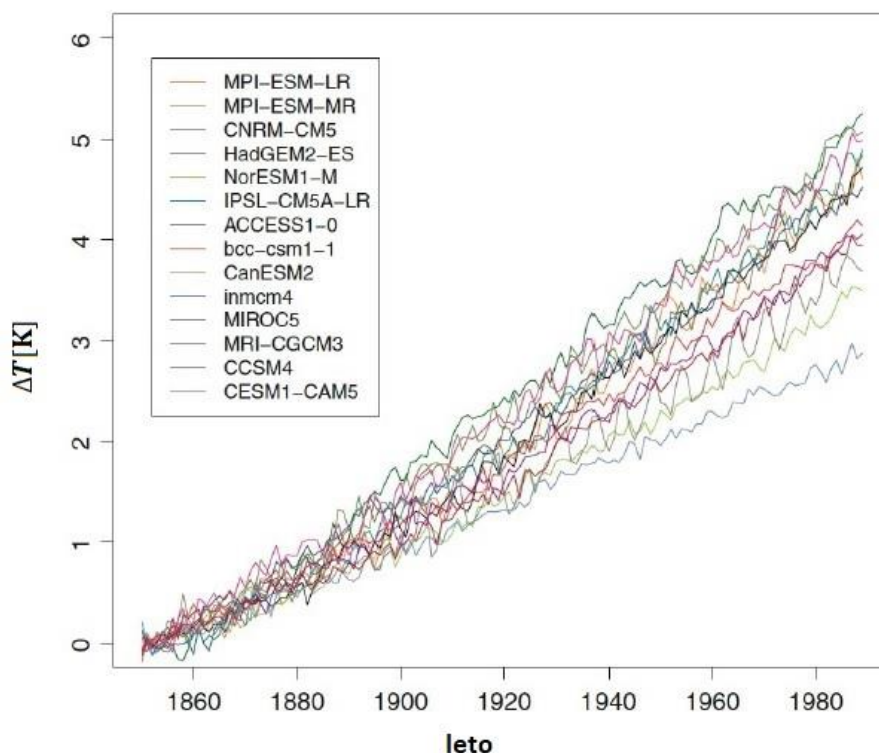
$$\alpha = \frac{1}{B} . \quad (35)$$

Podnebne občutljivosti α seveda ne moremo izračunati, če ne poznamo prepustnosti ozračja, od katere je odvisen toplogredni parameter B . Lahko pa si v pogojih, ki vladajo danes v ozračju, pomagamo s satelitsko izmerjeno vrednostjo prepustnosti ozračja $\tau = 0,23$ ($g = 0,615$) in

izračunano vrednostjo $B = 2,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ pri referenčni temperaturi $T_0 = 250 \text{ K}$. S pomočjo enačb (31) in (32) ter z znano podnebno občutljivostjo $\alpha = 1/B = 0,46 \text{ m}^2\text{K/W}$ ocenimo, za koliko se je ozračje v povprečju segrelo od predindustrijskega časa, z referenčno vrednostjo koncentracije CO_2 $C_0 = 280 \text{ ppm}$, do danes, ko so vrednosti v povprečju presegle $C = 410 \text{ ppm}$ (vir: Climate Central, 2018)

$$\Delta T = \alpha \Delta F = 0,46 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \cdot 5,35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \ln \frac{410}{280} \approx 1,0 \text{ K}, \quad (36)$$

kar se dobro ujema z eksperimentalno potrjenimi vrednostmi (Bergant, 2010, str.3). Primerjava rezultatov kaže, da naš enodimenzionalni model dokaj dobro opisuje podnebje in njegovo spremenljivost v globalni skali.



Slika 9: Globalno segrevanje ozračja pri eksponentnem naraščanju koncentracije CO_2 (vir: Schmittner, 2013, str.11).

Leta 2013 je bila opravljena zanimiva študija sevalnega prispevka CO_2 (Schmittner, 2013, str.11), pri kateri je bilo uporabljeno 14 najsodobnejših 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 $0,6 \text{ m}^2\text{K/W}$ in $1,1 \text{ m}^2\text{K/W}$. Kot je razvidno iz znanstvenega prispevka, so z modeli simulirali idealiziran numerični eksperiment, pri katerem so spremljali večanje koncentracije CO_2 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 9 je razvidno, da so vsi modeli napovedali globalno ogrevanje ozračja v razponu temperatur od 3 K do 5 K. Na rezultate študije se bomo sklicevali v poglavju 8 pri analizi in diskusiji eksperimentalno dobljenih vrednosti naše raziskave.

5. MATEMATIČNA FORMULACIJA PROBLEMA

5.1 Aproksimacija funkcij

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

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

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 $h_0(x), h_1(x), \dots, h_m(x)$

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

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

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

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)

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

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 $a_0, a_1, \dots, a_m$

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

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 (48) 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 (48) 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.

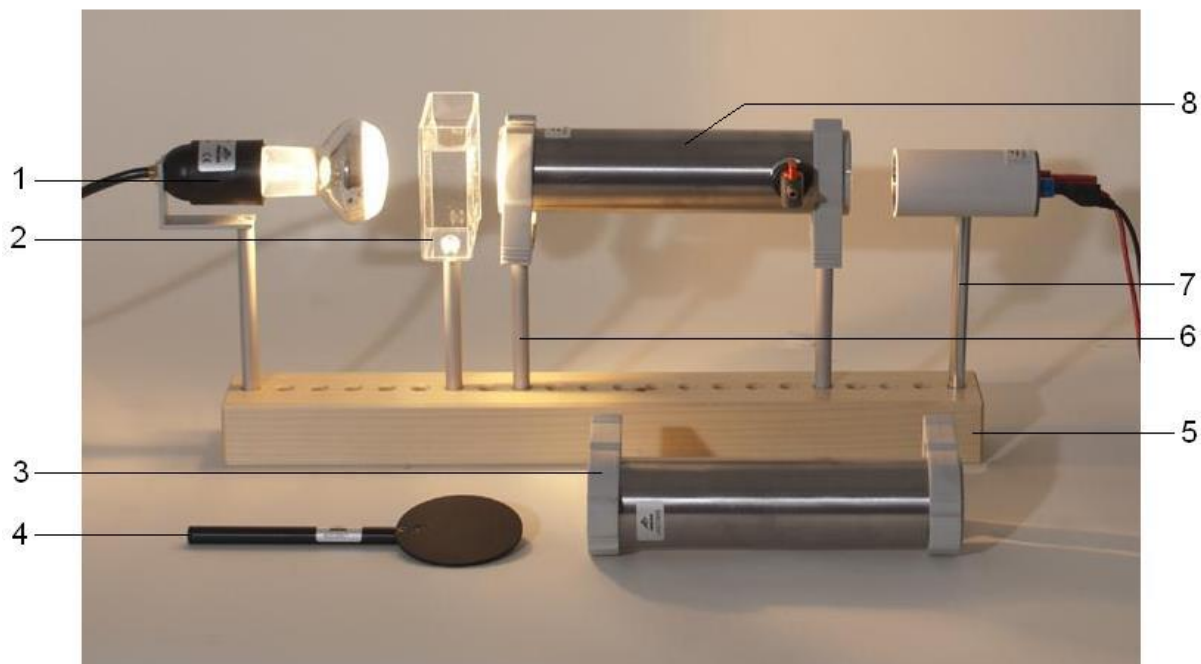
6. EKSPERIMENTALNI DEL

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 z značilnim potekom, kot je npr. prikazan na sliki 4. Dopuščamo možnost, da je absorpcijski koeficient odvisen tudi od temperature in tlaka, vendar moramo pri eksperimentu to odvisnost zanemariti.

6.1 Uporabljena eksperimentalna oprema

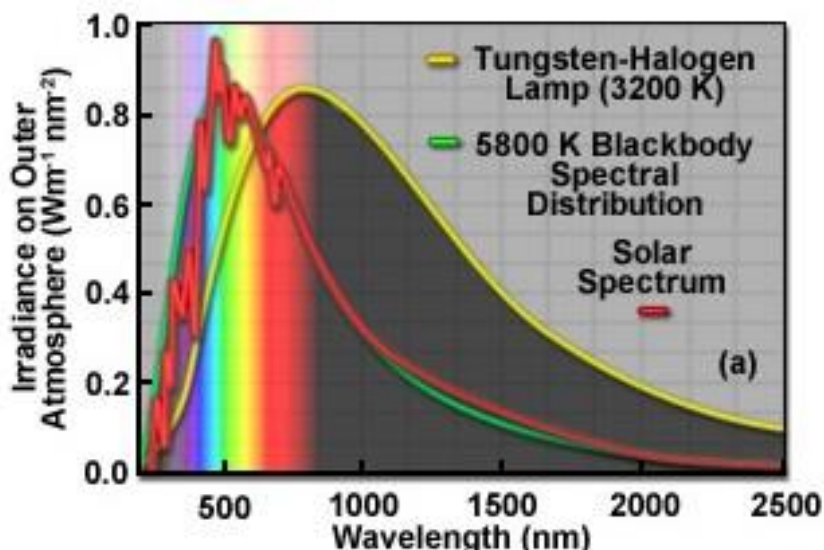
Pripomočki, ki smo jih uporabili pri merjenju prepustnosti ozračja so prikazani na sliki 10, kjer predstavljajo:

- | | |
|--|---|
| 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 10: Pripomočki, uporabljeni pri eksperimentu.

Z volframovo halogeno žarnico na žarilno nitko smo želeli čim bolj natančno simulirati spektralno porazdelitev sončnega sevanja. Na sliki 11 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 11: 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 12. 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).

6.2 Merjenje prepustnosti vzorcev za sončno in dolgovalovno sevanje

V tej fazi je bilo potrebno pripraviti vzorce dane množine zraka s primesjo CO_2 predpisane koncentracije. Na tržišču sicer obstajajo dokaj zanesljivi merilniki koncentracije CO_2 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

$$p_0 V_0 = N_z k_B T, \quad (55)$$

kjer je $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ Boltzmannova konstanta in $T[\text{K}]$ 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

$$pV = (N_z + N_c)k_B T = N_z \left(1 + \frac{N_c}{N_z}\right) k_B T = p_0 V_0 \left(1 + \frac{N_c}{N_z}\right), \quad (56)$$

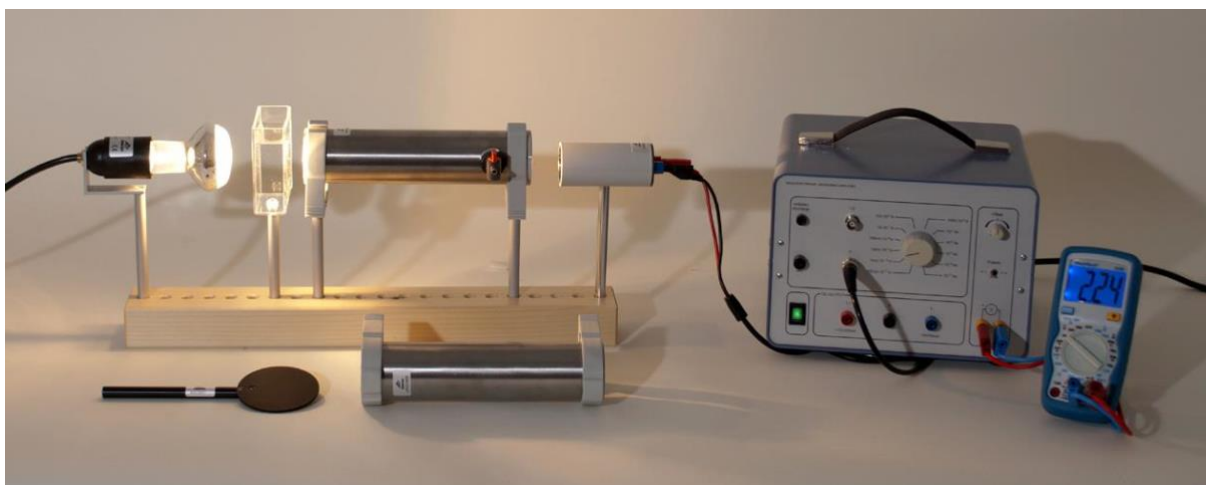
od koder izrazimo razmerje števila molekul

$$\frac{N_c}{N_z} = \frac{pV}{p_0 V_0} - 1 \quad (57)$$

in še koncentracijo CO_2

$$C = 10^6 \frac{N_c}{N_z} = 10^6 \left[\frac{p}{p_0} \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 - 1 \right]. \quad (58)$$

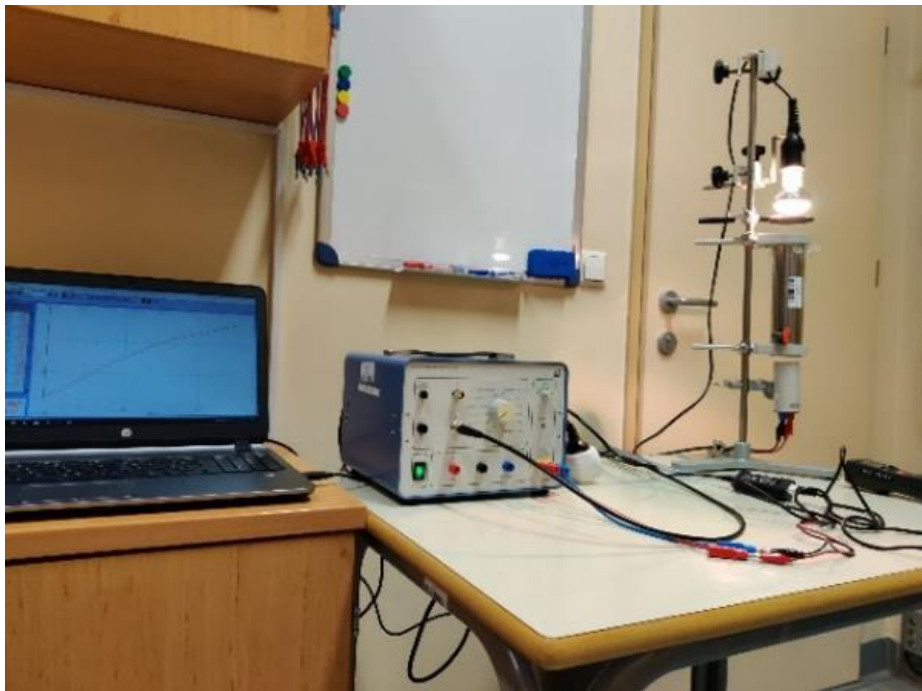
Glede na spekter izsevane svetlobe, ki je prikazan na sliki 11, predpostavljamo, da bomo kratkovalovno ($1,4 \mu\text{m}$ - $3 \mu\text{m}$) in del bližnjega IR sevanja žarnice ($0,7 \mu\text{m}$ - $1,4 \mu\text{m}$) filtrirali, če bomo svetlobni curek iz svetila pred poskusom spustili skozi primerno 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 12. Pri merjenju prepustnosti za dolgovalovno sevanje smo nadomestili kiveto z vodo s počrnjeno ploščico, ki smo jo segrevali z volframovo halogeno žarnico.



Slika 12: Namestitev naprav za izvedbo poskusa.

6.3 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 13. 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 10; 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 13: Vertikalna namestitvev 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 14: 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 14) izmerili obseg z vrvico, 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 (58) še koncentracijo CO₂.

Napolnjeni balon smo pretresli in ga z gibljivo cevko povezali s spodnjim ventilom absorpcijske komore, kot je prikazano na sliki 15. 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 15: Izpraznitev balona v absorpcijsko komoro.

6.4 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 preходом svetlobnega curka skozi primerno debelo plast vode v kivetu, ki smo jo namestili pred absorpcijsko komoro, smo filtrirali kratkovalovno (1,4 μm -3 μm) in del bližnjega IR sevanja žarnice (0,7 μm -1,4 μm). 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 počrtnjeno 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

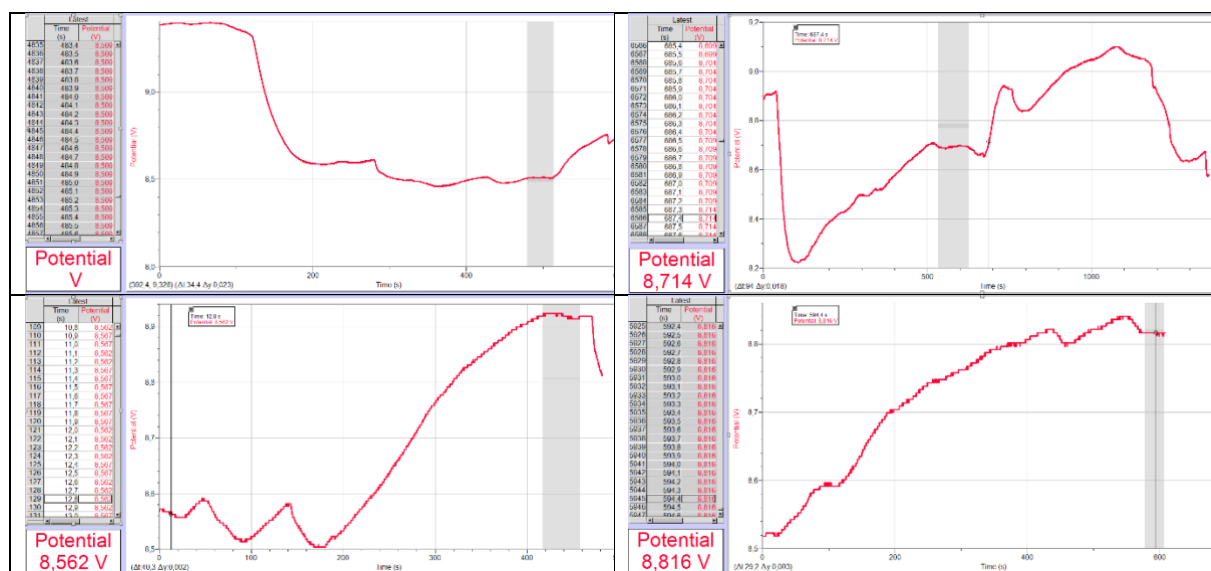
$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{438 \text{ K}} \approx 6,6 \text{ } \mu\text{m} \quad (59)$$

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 5.

Rezultati meritev so zbrani v preglednici 2. 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 (58) izračunano koncentracijo CO₂ in U izmerjeno napetost termočlena. Grafi na sliki 16 prikazujejo za čisti CO₂ ter zmesi 1, 2 in 3 časovne poteke napetosti termočlena.

Preglednica 2: 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 16: Napetost termočlena za čisti CO₂ (levo zgoraj), zmes1 (desno zgoraj), zmes2 (levo spodaj) in zmes3 (desno spodaj) v odvisnosti od časa.

6.5 Grafični prikaz rezultatov meritev

V stolpcu U' preglednice 2 so zajete vrednosti aproksimacijske funkcije pri vrednostih koncentracije C , ki se rezultatom meritev najbolj prilega. Poudariti moramo, da je zapisana

vrednost koncentracije čistega CO₂ izmišljena, saj v tem primeru koncentracije, podane v ppm, ki pomeni število molekul CO₂ na milijon molekul zraka, sploh ne moremo definirati. Pri konstrukciji eksponentne funkcije U' , ki jo prikazuje graf 1, smo si pomagali s programom Logger Pro. Glede na funkcijske vrednosti U , ki so rezultat meritev, program nariše eksponentno funkcijo U'

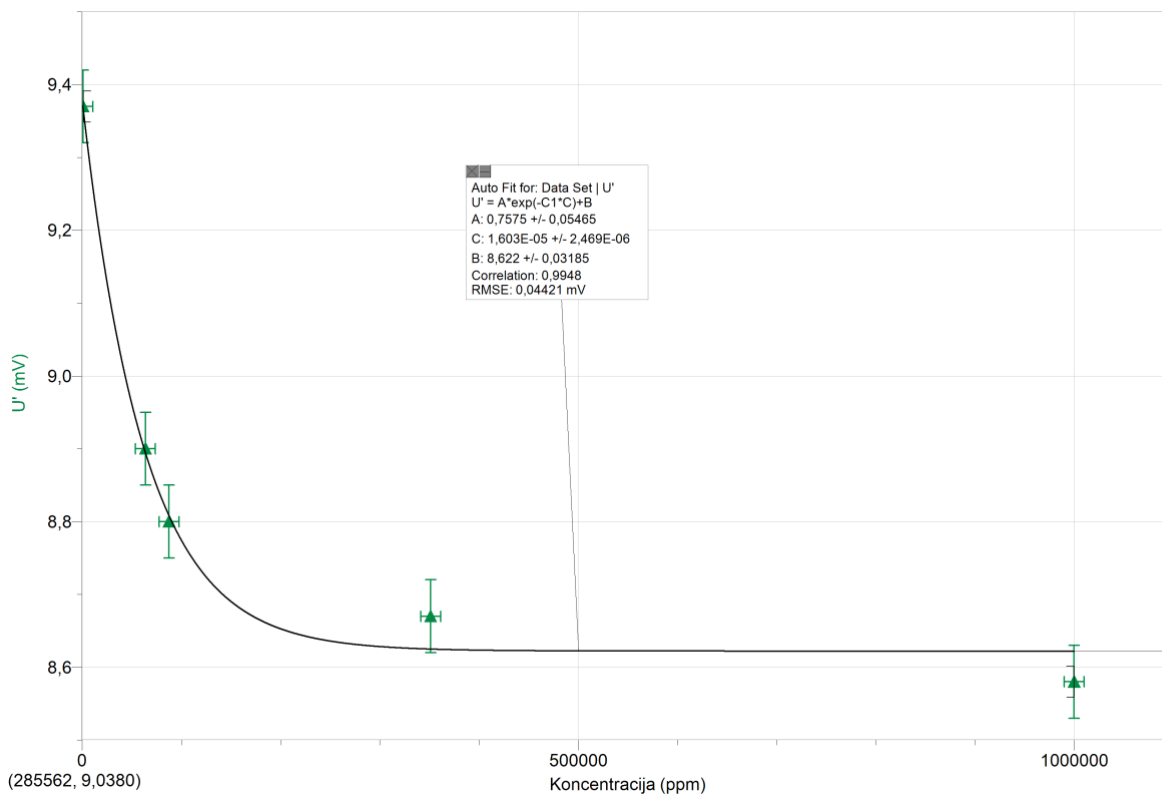
$$U'(C) = ae^{-bC} + c, \quad (60)$$

kjer so računalniško dobljene vrednosti parametrov a , b in c

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

$$b = (1,603 \cdot 10^{-5} \pm 2,469 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{ppm}}, \quad (61)$$

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



Graf 1: Krivulja za napetost termočlena U' , v odvisnosti od koncentracije.

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{(U_1 - U'_1)^2 + (U_2 - U'_2)^2 + \dots (U_n - U'_n)^2}{n}}, \quad (62)$$

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%.

7. 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 Logger Pro (61).

7.1 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

$$U_t(\lambda, C) = U_0(\lambda)e^{-k(\lambda)Cd} \quad (63)$$

in po logaritmiranju

$$\ln U_t = \ln U_0 - kdC. \quad (64)$$

Vpeljimo nove oznake

$$y = \ln U_t, \quad a_0 = \ln U_0, \quad a_1 = -kd, \quad x = C. \quad (65)$$

Za tabelo

$$\begin{aligned} x &: C_1, C_2, \dots, C_n \\ y &: \ln U_{t1}, \ln U_{t2}, \dots, \ln U_{tn} \end{aligned} \quad (66)$$

poiščimo po metodi najmanjših kvadratov linearno aproksimacijsko funkcijo

$$f(x) = a_0 + a_1x. \quad (67)$$

Sistem enačb za koeficienta a_0 in a_1 je

$$\begin{aligned} s_0a_0 + s_1a_1 &= t_0 \\ s_1a_0 + s_2a_1 &= t_1, \end{aligned} \quad (68)$$

kjer je po (47)

$$s_0 = 4, \quad s_1 = \sum_{i=1}^4 x_i, \quad s_2 = \sum_{i=1}^4 x_i^2, \quad t_0 = \sum_{i=1}^4 y_i, \quad t_1 = \sum_{i=1}^4 y_i x_i. \quad (69)$$

Po krajšem računu dobimo za koeficienta naslednja izraza

$$a_0 = \frac{t_1s_1 - t_0s_2}{s_1^2 - s_0s_2}, \quad a_1 = \frac{t_0s_1 - t_1s_0}{s_1^2 - s_0s_2}. \quad (70)$$

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 $y(C)$ izrazimo $\ln U_t$ pri poljubno izbrani koncentraciji.

7.2 Določanje prepustnosti ozračja

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

$$\tau(\lambda) = \frac{j_t(\lambda)}{j_0(\lambda)} = \frac{U_t(\lambda)}{U_0(\lambda)} = e^{-k(\lambda)Cx}. \quad (71)$$

Pri dani koncentraciji zmesi C v absorpcijski komori z dolžino $x = d = 20,5$ cm lahko po enačbi (71) izračunamo njeno prepustnost kot

$$\tau_d(\lambda) = e^{-|a_1|C} \approx 1 - |a_1|C, \quad (72)$$

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 (71) in predpostavimo, da se absorpcijska konstanta $k(\lambda)$ z višino ne spremeni

$$\tau(\lambda, h) = e^{-k(\lambda)Ch}. \quad (73)$$

Enačba (73) potrjuje domnevo, da se prepustnost ozračja z dano koncentracijo CO_2 za dolgovalovno sevanje valovne dolžine λ z višino h eksponentno zmanjšuje. Enačbi (72) in (73) logaritmujemo in delimo

$$\frac{\ln \tau}{\ln \tau_d} = \frac{h}{d} \Rightarrow \tau(h) = \tau_d^{\frac{h}{d}}, \quad (74)$$

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

7.3 Numerični algoritem

Zaradi kompleksnosti reševanja iteracijske funkcije enodimenzionalnega podnebne modela, s pomočjo katerega nameravamo računati približni potek temperature po posameznih širinskih pasovih (19) in povprečno temperaturo Zemljinega površja (20), smo v nalogi za programsko osnovo izbrali odprtokodni programski paket Scilab različice 6.0.2. Program smo dobili na strani svetovnega spleta <https://www.scilab.org/> in ga brezplačno namestili na računalnik. Narejen je iz prevajalnika 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 (Makarovič, 2005, str. 1–3).

Podatke iz preglednice 1 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«.

Z izbranimi začetnimi temperaturami $T_i^{(0)}$ po posameznih pasovih računalniški algoritem iteracijsko izračunava nove približke. 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.

7.4 Preverjanje pravilnosti numeričnega algoritma

Pravilnost numeričnega algoritma najlažje preverimo tako, da rezultate računalniškega modeliranja primerjamo z dostopnimi rezultati, ki so objavljeni v strokovni literaturi. Testirajmo delovanje računalniškega programa pri računanju povprečne temperature na Zemlji s privzetimi vrednostmi empiričnih konstant, s katerimi opišejo klimatologi v današnjih pogojih, ki vladajo v ozračju, učinek tople grede v (Schmittner, 2013, str. 9)

$$A = 204,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad B = 2,17 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}, \quad K = 3,81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}. \quad (75)$$

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 1.

V preglednici 3 so prikazani rezultati numeričnega preračuna temperature po posameznih pasovih in povprečna temperatura Zemlje $\bar{T}$. 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. Vse temperature v preglednici so podane v °C.

Preglednica 3: Temperature po širinskih pasovih in povprečna temperatura Zemlje.

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

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. Albedo s snegom pokritih tal lahko variira v mejah med 0,5 do 0,8, odvisno od tipa vegetacije, oblačnosti in razmerja sneg/led.

Preglednica 4: 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

V mejah med vrednostmi albeda 0,5 do 0,8 smo tudi raziskali občutljivost uporabljenega podnebne modela. Izbrali smo $T_{kr} = -10 \text{ °C}$, konvergenčni kriterij je predstavljala napaka 10^{-3} . Primerjajmo še rezultate numerične simulacije, ki so zbrani v preglednici 4, z zanesljivimi rezultati, ki so znani in sprejeti v strokovni javnosti (Vrhovec, 2001, str. 337). Dobro ujemanje rezultatov zagotavlja pravilnost algoritma, s katerim nameravamo opraviti numerični del raziskav pri ugotavljanju vpliva koncentracije CO_2 na prepustnost ozračja.

8. ANALIZA IN DISKUSIJA

V nalogi smo raziskovali ozračje, ki je zagotovo najbolj nestabilen in nenehno spreminjajoči se del podnebne sistema. Med toplogrednimi plini, ki močno absorbirajo elektromagnetno valovanje z daljšimi 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 prepustnost ozračja in povprečno temperaturo Zemlje, 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% (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, 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.

8.1 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 satelitsko pridobivajo različne podatke o sevanju CO₂, ki pomagajo določati količino tega plina v ozračju.

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. V resnici se vsebnost CO₂ v ozračju tudi nekoliko spreminja preko letnih časov in iz kraja v kraj, vendar teh sprememb v nalogi ne moremo upoštevati. Območje koncentracij smo izbrali tako, da bomo lahko eksperimentalno dobljene vrednosti naše raziskave primerjali z rezultati študije globalnega segrevanja ozračja pri eksponentnem naraščanju koncentracije CO₂, ki so prikazani na sliki 9 (Schmittner, 2013, str.11).

S pomočjo enačbe (72) smo pri izbrani koncentraciji C izračunali najprej prepustnost absorpcijske komore τ_a z dolžino $d = 20,5 \text{ cm}$. Z znano vrednostjo τ_a smo v drugem delu po enačbi (74) 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

$$A = -3g\sigma T_0^4, \quad B = 4g\sigma T_0^3. \quad (76)$$

Kot je bilo razloženo pri linearizaciji dolgovalovnega sevanja Zemlje v podpoglavju 3.2, smo pri različnih vrednostih toplogrednega parametra g računali A in B z referenčno temperaturo $T_0 = 250 \text{ K}$. 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 po enačbi (19) računali potek temperature po posameznih širinskih pasovih in z enačbo (20) še povprečno temperaturo Zemljinega površja.

Preglednica 5: 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	2,8289	7,2517
300	0,5662	0,7831	202,3621	2,7751	8,4688
400	0,4732	0,7366	196,1845	2,6103	11,3804
500	0,3934	0,6967	192,8320	2,4689	12,8763
600	0,3301	0,6651	191,8743	2,3569	13,9671
700	0,2746	0,6373	190,4288	2,2584	14,5543
800	0,2251	0,6123	189,7632	2,1698	15,1612
900	0,1733	0,5867	189,2342	2,0791	15,5286
1000	0,1357	0,5679	188,6345	2,0125	15,7096
1100	0,1030	0,5515	188,2130	1,9544	15,8109
1120	0,1029	0,5514	187,9714	1,9540	15,8988

Preglednica 6: Izračun toplogrednih parametrov A in B pri višini ozračja 30 km.

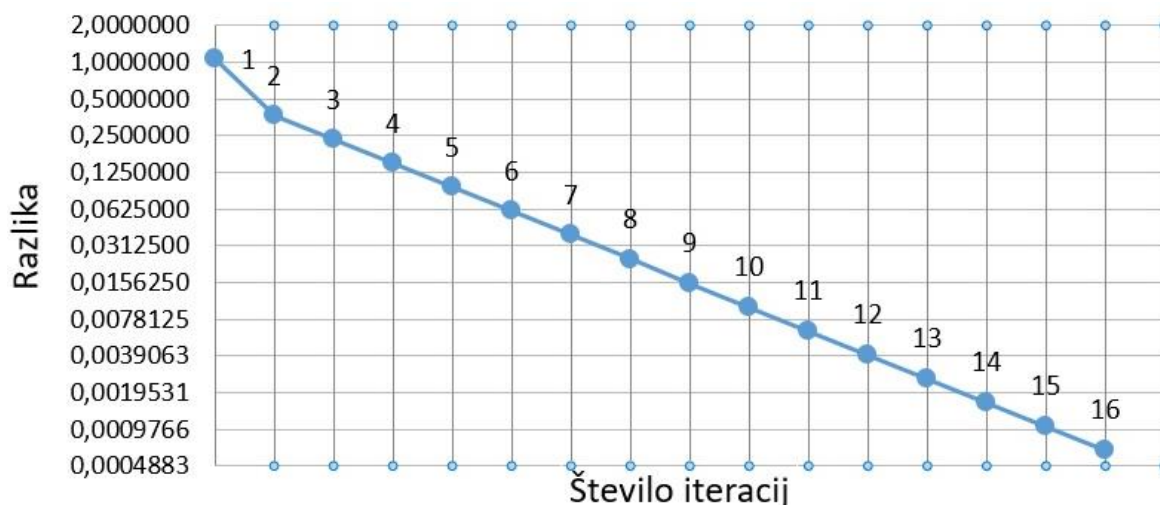
$C(\text{ppm})$	τ	g	A	B	$\bar{T}(^{\circ}\text{C})$
280	0,3558	0,6779	195,8321	2,4023	11,3623
300	0,3206	0,6603	194,3206	2,3399	12,3814
400	0,2232	0,6116	189,5118	2,1674	14,7163
500	0,1548	0,5774	187,9849	2,0462	16,1710
600	0,1090	0,5545	187,3531	1,9650	16,9840
700	0,0810	0,5405	187,0308	1,9154	17,5063
800	0,0530	0,5265	186,9747	1,8558	17,8558
900	0,0336	0,5168	186,9561	1,8314	18,1428
1000	0,0202	0,5101	186,9499	1,8077	18,3452
1100	0,0158	0,5079	186,9479	1,7999	18,4454
1120	0,0106	0,5053	186,8596	1,7907	18,4868

V preglednicah 5 in 6 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.

8.2 Konvergenca rešitve in vpliv začetnih pogojev

Z izbranimi začetnimi temperaturami $T_i^{(0)}$ po posameznih pasovih računalniški algoritem iteracijsko izračunava nove približke po enačbi (22). 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. Za ilustracijo uporabimo primer iz preglednice 6 pri vrednosti koncentracije CO_2 400 ppm, kjer je konvergenčni kriterij predstavljal napaka

velikosti 10^{-3} . Graf 2 prikazuje, kako smo se z vsako iteracijo bližali rešitvi oz. kako se je pri danem konvergenčnem kriteriju vrednost rešitve ustalila.



Graf 2: Razlika dveh zaporednih približkov v odvisnosti od števila iteracij.

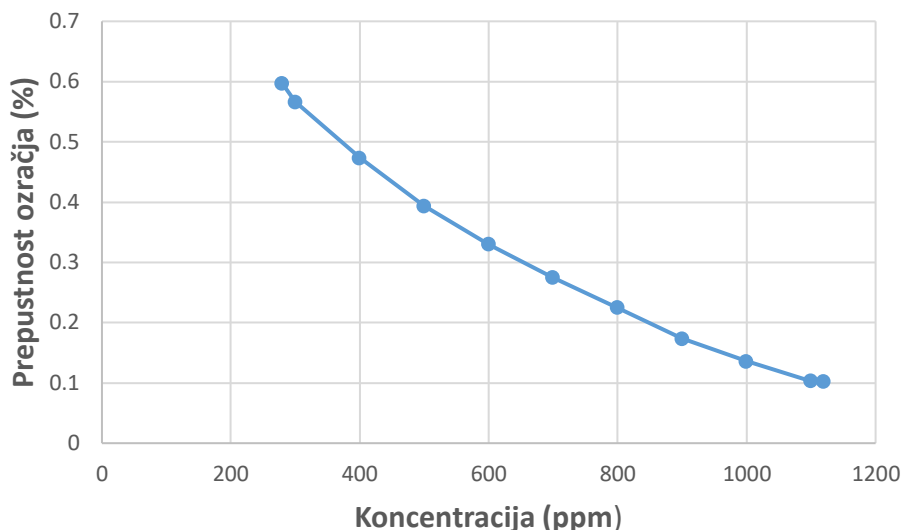
Ker je število iteracij povezano z izbiro začetnih pogojev, je smiselno še preveriti, kako se sistem odzove na različno izbrane začetne temperature $T_{in}^{(0)}$ po posameznih pasovih. Ponovno smo izbrali isti primer iz preglednice 6, z vrednostjo koncentracije CO₂ 400 ppm. Rezultati numeričnih preračunov so zbrani v preglednici 7, 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 $T_i^{(0)} > T_{kr} = -10$ °C. Vse temperature v preglednici so podane v °C.

Preglednica 7: 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

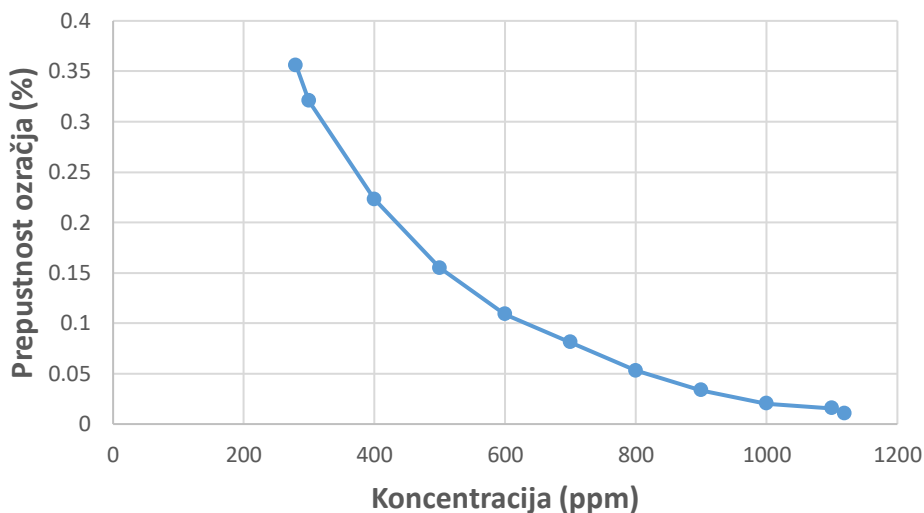
8.3 Vpliv koncentracije CO₂ na prepustnost ozračja

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.



Graf 3: Prepuštnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 15 km.

Najprej si oglejmo rezultate prepuštnosti ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 dobljene s predpostavko, da se ozračje zaključi v višini 15 km nad zemeljskim površjem, kot prikazuje preglednica 5. V tem modelu bi znašala prepuštnost ozračja v predindustrijskem času pri koncentraciji $C = 280 \text{ ppm}$ CO_2 približno 60% in pri današnjih pogojih z vrednostjo $C \approx 400 \text{ ppm}$ okoli 47%. Kljub relativno majhni višini ozračja presenečajo dokaj visoke vrednosti prepuštnosti. Na grafu 3, ki prikazuje odvisnost prepuštnosti ozračja od koncentracije CO_2 , opazimo eksponentno padanje v skladu z enačbo (73).



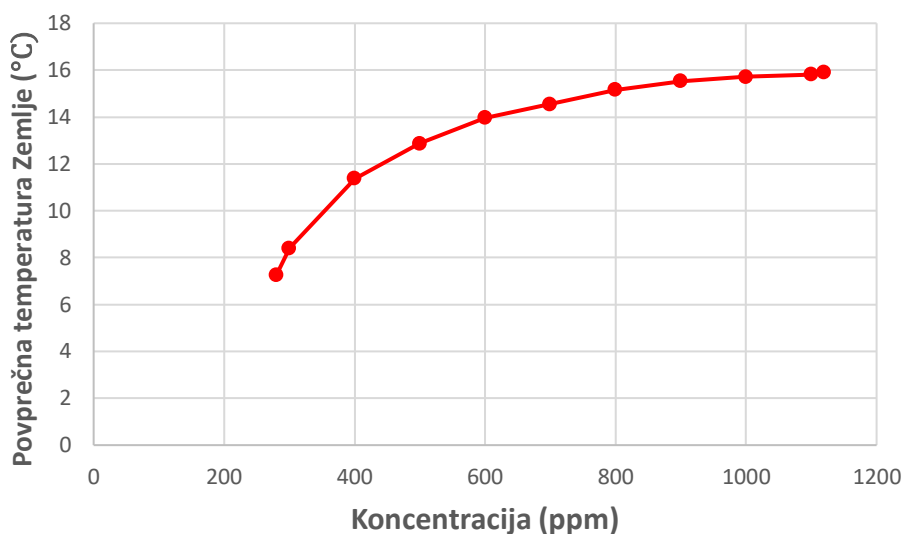
Graf 4: Prepuštnost ozračja v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.

Primerjajmo rezultate simulacije še z vrednostmi za prepuštnost pri višini ozračja 30 km, ki jih povzamemo iz preglednice 6. Za prepuštnost ozračja pri koncentraciji $C = 280 \text{ ppm}$ dobimo sedaj okoli 36% in pri današnjih pogojih, z ocenjeno vrednostjo koncentracije CO_2 $C \approx 400 \text{ ppm}$, nekaj čez 22%, kar precej bolj ustreza satelitsko izmerjeni vrednosti slabih 30%, ki jo navaja pri jasnem vremenu strokovna literatura. Graf 4 prikazuje odvisnost prepuštnosti ozračja od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km nad površjem Zemlje.

Napravimo še nekaj primerjav rezultatov obeh numeričnih izračunov. Opažamo, da vrednosti prepustnosti pri koncentracijah 300, 400 in 500 ppm v preglednici 6 dobro sovpadajo z vrednostmi v preglednici 5 pri vrednostih koncentracije 600, 800 in 1000 ppm. To je povsem v skladu z enačbo (73), po kateri se vrednost prepustnosti ne spremeni, če ostane produkt koncentracije in višine Ch v eksponentu enačbe konstanten. Iz preglednice 6 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%.

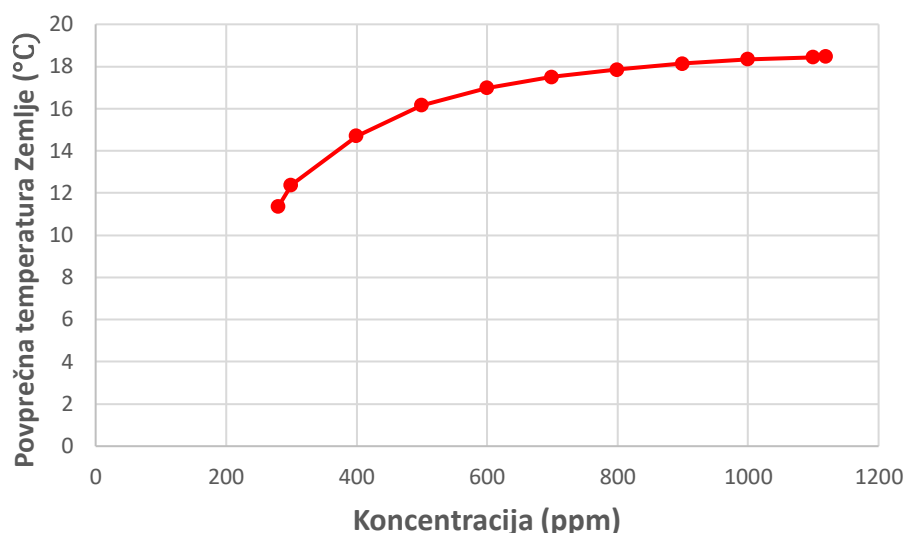
8.4 Vpliv koncentracije CO₂ na povprečno temperaturo Zemlje

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 5. Iz preglednice ali iz grafa 5 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, če jo primerjamo z rezultati študije (Schmittner, 2013, str.11), ki smo jo omenili na str. 23.



Graf 5: Povprečna temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO₂ pri višini ozračja 15 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 6. Iz preglednice ali iz grafa 6 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 (Climate Central, 2018). Temperaturna razlika med stanjem ozračja s koncentracijo 280 in 1120 ppm znaša sedaj sprejemljivih 7,1 °C.



Graf 6: Povprečna temperatura Zemlje v odvisnosti od koncentracije CO_2 pri višini ozračja 30 km.

Preglednica 8: 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

Namenimo še nekaj besed preglednici 8, kjer so pri izbranih koncentracijah in višini ozračja 30 km zbrani rezultati numeričnega preračuna za povprečne temperature Zemlje in temperature po posameznih širinskih pasovih. Iz preglednice 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 izvemo, 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.

9. 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.

- Kot prvi numerični primer smo analizirali rezultate prepustnosti ozračja v odvisnosti od koncentracije CO₂ dobljene s predpostavko, da se ozračje zaključí 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 zaključí 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 zmanjša prepustnost ozračja in poviša povprečna temperatura na površju Zemlje. S tem smo tudi v celoti dosegli in potrdili zastavljene cilje raziskovalne naloge.

10. UPORABNA VREDNOST OPRAVLJENIH RAZISKAV

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. Skoraj nujno bi bilo sprejeti nove, bolj ambiciozne podnebne in okoljske načrte, ki bi bili v dolgoročnem interesu prebivalcev vsega sveta.

Resnosti stanja so se že pred leti zavedali pri izobraževalni organizaciji International Baccalaureate Organisation (IBO), saj so problematiko podnebnih sprememb in pojav tople grede uvrstili v obvezni del učnega načrta za fiziko. Dijaki morajo razumeti mehanizem absorpcije elektromagnetnega valovanja v molekulah toplogrednih plinov, znati morajo pojasniti vpliv pojava tople grede na podnebje na Zemlji in uporabiti preproste podnebne modele za oceno globalnega segrevanja.

Po posvetu z učiteljem fizike v programu mednarodne mature se bodo rezultati raziskovalne naloge začeli uporabljati kot kompleksnejši primer pri obravnavi tovrstne tematike. S spreminjanjem parametrov simulacije, bodo lahko dijaki s pomočjo napisanega programa numerično preverjali, kako le-ti vplivajo na temperaturo na Zemlji in kakšni bi morali biti ukrepi za ustavitev globalnega segrevanja.

Tako se bodo verjetno že v prihodnjem šolskem letu začeli izsledki in eksperimentalni del naloge izvajati kot demonstracijski poskus v sklopu obveznega učnega načrta za fiziko v programu mednarodne mature na II. gimnaziji v Mariboru, prav zagotovo pa bo pokazala zanimanje tudi katera od drugih šol v Sloveniji, kjer izvajajo omenjeni program. Z nekaj prilagoditvami pa bi lahko bile računalniške simulacije tudi uporaben pripomoček pri okoljski vzgoji na vseh stopnjah izobraževanja.

11. ZAKLJUČEK

Neizpodbitno je dejstvo, da podnebnim spremembam ne moremo več ubežati, so dejstvo sedanjosti in še večja grožnja prihodnosti. Podnebne spremembe, ki so posledica človeških aktivnosti se že dogajajo in bodo njihove posledice v prihodnosti vse hujše⁶. 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).

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.

Ko smo 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 daljšimi valovnimi dolžinami in igrajo ključno vlogo v energijski bilanci Zemlje, se nam je zdelo smiselno osredotočiti se na prispevek CO₂.

Izdelali smo enodimenzionalni 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.

Zavedamo se, da smo v nalogi realne razmere v ozračju precej poenostavili. Seveda bi bilo povsem nesmiselno in celo naivno primerjati našo metodo raziskovanja ozračja z znanstvenimi metodami v sodobni klimatologiji, podprti z zahtevnimi tridimenzionalnimi modeli. Smo pa vendarle z relativno preprostimi numeričnimi simulacijami dosegli cilje in potrdili hipotezo, da prejmejo tla ob povečanju koncentracije CO₂ več atmosferskega IR sevanja, kar posledično vpliva na povišanje povprečne temperature na površju Zemlje.

⁶ 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.

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. Bertalanič, 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 (67)	$[-]$
a_1	koeficient v enačbi (67)	$[-]$
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 (60)	$[\text{1/ppm}]$
$\vec{b}$	vektor v enačbi (43)	$[-]$
C	koncentracija	$[\text{ppm}]$
C_0	referenčna koncentracija	$[\text{ppm}]$
C^*	toplotna kapaciteta	$[\text{J/K}]$
c	parameter v enačbi (60)	$[\text{mV}]$
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	$[-]$
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_r	ravnovesna temperatura	[K]
T_i	temperatura v i -tem širinskem pasu	[K]
$T_i^{(0)}$	začetna temperatura v i -tem pasu	[°C]
$T_i^{(j)}$	temperatura v i -tem pasu na j -tem iteracijskem koraku	[°C]
T_{kr}	kritična temperatura	[°C]
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	empirični parameter, ki opiše učinek tople grede za CO ₂
alfa	albedo
B	empirični paramete, ki opiše učinek tople grede za CO ₂
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-številka pasu

S0=1370 *//solarna konstanta*

A=204 *//parameter toplogrednega učinka (CO2)*

B=2.17 *//parameter toplogrednega učinka (CO2)*

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]

// rezerviran spomin za Tnova

Tnova=zeros(n,1)

//odstopanje od rezultata za zaustavitveni kriterij

Raziskovalna naloga: Vpliv koncentracije ogljikovega dioksida v ozračju na toplotno bilanco Zemlje

```
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 (ponavljaj, dokler se ne zgodi eno ali drugo)
while (Razlika>odstopek & k<100)
    k=k+1 //vsakič povečaj 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 števcu
    end

    for i=1:n
        if Tstara(i)>Tkr then //pogojni stavek za izbiro kritične temperature
            alfa=0.3 //vrednost za albedo nad kritično temperaturo
        else
            alfa=0.6 //vrednost za albedo pod kritično 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")
```