

Fizički utemeljen teorijski okvir makro-energetskog sustava Zemlje

Physically-Based Theoretical Framework of Earth's Macro-Energetic System

izv. prof. dr. sc. Danijel Pavković
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu
daniyel.pavkovic@fsb.hr

mr. sc. Ivica Billege
ZVNPGE HAZU
ivicabillege@gmail.com



Ključne riječi: Zemljin atmosferski model, makro-energetski sustav, Stefan-Boltzmannov zakon, dolazno sunčevo zračenje, zakon o idealnom plinu, atmosferska apsorpcija, propusnost i refleksija, predviđanje prosječne površinske temperature

Key words: Earth's atmospheric model; macro-energetic system; Stefan-Boltzmann law; incoming solar radiation; ideal gas law; atmospheric absorption, transmittance and reflection, average surface temperature prediction.

Sažetak

Ovaj rad predstavlja prosječni model Zemljinog makro-energetskog sustava koji se sastoji od Sunca kao primarnog izvora energije zračenja, Zemljine atmosfere kao dvosmjernog polupropusnog zaslona zračenja i Zemljine površine tako da se uspostavlja stacionarni balans dolazne energije i energije emitiranja natrag u svemir, uzimajući u obzir kemijska svojstva Zemljine atmosfere i poštujući Stefan-Boltzmannov zakon zračenja. Model je provjeren na temelju ažurnih informacija o ključnim parametrima Zemljinog modela sivog tijela, tj. Albedo i koeficijenta emisije te je uspio predvidjeti općeprihvaćenu prosječnu vrijednost zemljine temperature isključivo na temelju poznatog sastava zemljine atmosfere.

Abstract

This paper presents the averaged model of the Earth's macro-energetic system comprising of Sun as the primary radiation energy source, Earth's atmosphere as a bidirectional semi-transparent radiation screen and Earth's surface in such a way so that a stationary balance of incoming energy and energy emitted back into Space is established, while taking into account the chemical properties of the Earth's atmosphere and honoring the Stefan-Boltzmann law of radiation. The model has been validated based on the up to date information about key parameters of the Earth's gray body model, i.e. Albedo and emission coefficient and has been able to predict the commonly accepted average value of Earth's surface temperature solely based on the known composition of Earth's atmosphere.

1. Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća vodila se burna rasprava o temi globalnog zagrijavanja i klimatskih promjena [5,7,9,10,11,12,13], s tim da su ugljični dioksid i drugi „staklenički“ plinovi trenutno identificirani kao vjerojatni krivci [16,17,20,22,23,24]. No, znanstvena zajednica ni na koji način nema jedinstveno stajalište o ovoj temi. Zapravo, širok spektar mišljenja

trenutno je prisutan u javnom diskursu, od zagovornika stakleničkih plinova koji u potpunosti i neupitno prihvaćaju GHG kao glavni uzrok globalnog zagrijavanja [27,4,35,36,49,50,51,52], do onih unutar zajednice koji su izrazito skeptični prema GHG-ovima glavni je uzrok trenutno promatranih klimatskih promjena^[53,54,55,57,58]. Jedna od glavnih tvrdnji je činjenica da ažurirane procjene prosječne globalne temperature temeljene na trenutno dostupnim podacima mjerenja ne podržavaju u cjelini ostale promatrane podatke, poput neravnoteže dolaznog protoka energije sunčevog zračenja i odlazne energije protoka zračenja sa Zemlje [10,23,53,57]. Dakle, trenutno postoji određeni raskorak u znanju, dok se istodobno uočena neravnoteža omjera ulazne i odlazne energije zračenja makro-energetskog sustava Zemlje pripisuje efektu „stakleničkih plinova“ [4,14,25,26,59].

Kako bismo pokušali razjasniti ova otvorena pitanja, ovaj rad predstavlja izravan model zemljinog makro-energetskog sustava, koji se sastoji od Sunca kao dominantnog izvora energije koji se očituje kao nadolazeći tok sunčevog zračenja u smjeru Zemlje, zemljinu površinu i zemljinu atmosferu modeliranu kao mješavinu idealnih plinova i vodene pare koji tvore dvosmjerni polupropusni zaslون između dolaznog sunčevog zračenja i energije zračene iz Zemljine površine, pri čemu mješavina atmosferskih plinova karakterizira svojstva refleksije, apsorpcije i propusnosti. Predloženi model zasnovan je na osnovnim fizikalnim zakonima očuvanja energije i zakonu Stefan-Boltzmanna, a parametriran je korištenjem ažuriranih procjena refleksije Zemlje (Albedo) i faktora emisije.

Da bi se uzeo u obzir utjecaj zemljine atmosfere na ukupnu energetsku bilancu, koristi se zakon o idealnim plinovima koji opisuje ključna svojstva vlažne mješavine atmosferskih plinova za dobivanje ovisnosti između temperature Zemlje na površini i gustoće mješavine atmosferskih plinova. Atmosferski plinovi prosječne gustoće naknadno se koriste za karakterizaciju svojstava propusnosti i apsorpiranja atmosferske mješavine vlažnih plinova kao polupropusnog zaslona (membrane) dolaznom i odlaznom protoku energije zračenja, a kvantificira efektivnim površinskim omjerom (predstavljajući refleksijski zaslonski efekt atmosferskog omotača) i efektivnim omjerom volumena (predstavljajući svojstvo energetske apsorpcije atmosferskog omotača).

Tako dobiveni model se zatim koristi za predviđanje ažurirane vrijednosti prosječne temperature Zemlje na površini, kao i za ilustraciju osjetljivosti predviđanja prosječne globalne temperature na varijacije ključnih

parametara, poput dolaznog fluksa sunčevog zračenja, Albedo i faktor emisije te atmosferski sastav i gustoća plinova. Konačno, predstavljeno je softversko okruženje koje implementira predloženi model, a njegova je funkcionalnost prikazana za gore spomenuti nominalni slučaj predviđanja stvarne prosječne globalne temperature.

2. Teorijska baza

U okviru zemljinog makro-energetskog sustava koji sačinjavaju tri bitne celestijalne sastavnice „Zemlja, zemljina atmosfera i Sunce“, Sunce predstavlja ključni energetski generator koji za nekoliko redova veličina nadmašuje sve ostale zajedno. Poznato je da Sunce sa svoje visoko-temperaturne plazmatske površine od oko 5500 °C koncentrično emitira radijacijsku energiju u svoju svemirsku okolinu pa tako u smjeru zemljine kružne siluete s distance od oko 150 milijuna kilometara, tako da u smjeru zemljine atmosfere zrači prosječno oko 1367 W/m² svoje radijacijske energije.

2.1. Zakoni o očuvanju energije, prijenosu energije zračenja i idealnim plinovima

Model se izvodi iz jednog od osnovnih zakona termodinamike koji se primjenjuju na energetske sustave, a koji bi također trebao biti valjan za predmetni makro-energetski sustav Zemlje prema kojem apsorbirana energija koja dolazi od Sunca (dolazni energetski tok E_a) na zemljinu površinu treba biti jednaka energiji emitiranoj s te površine u njezino hladnije okruženje, tj. vanjski prostor (odlazni energetski tok E_e).

Apsorbirana energija sunčevog zračenja na zemljinoj površini (E_a) definirana je kako slijedi [62,63,64,65]:

$$E_a = (1-a)\pi R^2 S_0 \quad (1)$$

gdje je:

a = prosječni faktor refleksije (Albedo) za dolazno sunčevo zračenje od zemljine atmosfere i djelomično od zemljine površine. Poprima vrijednosti između 0 i 1, pri čemu 0 označava izostanak refleksije, dok 1 označava totalnu refleksiju.

$$\pi = 3.14159$$

R = srednji polumjer Zemlje (m)

S_0 = tipični tok energije sunčevog zračenja po jedinici zemljine površine ($S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$)

S druge strane, emitirana zemljina energija zračenja (E_e) definira se kao [62,63,64,65]:

$$E_e = (4\pi R^2)\sigma T_e \quad (2)$$

gdje je:

σ = Stefan–Boltzmannova konstanta

($\sigma = 0,0000000567 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

e = emisijski faktor zemljine površine (u idealnom slučaju ukupna emisivnost $e = 1$), koja se za trenutnu topografiju zemljine površine i druge faktore procjenjuje na $e = 0,612$. Faktor emisije se definira kao omjer energije zračenja koju tijelo (u ovom slučaju Zemlja) emitira u okolinu s obzirom na energiju zračenja koju bi emitirao idealni (savršeni) emiter (idealno crno tijelo, $e = 1$).

Prema zakonu o očuvanju energije, apsorbirana energija bi trebala biti jednaka emitiranoj energiji u stabilnom stanju, to jest:

$$E_a = E_e \quad (3)$$

Stoga se Stefan-Boltzmannov zakon zamjenjuje zakonom o prijenosu energije zračenjem kompaktnih „sivih“ tijela ($E = e\sigma T^4$) u jednadžbi (3) i uzimajući u obzir zemljine geometrijske karakteristike i zemljine površinske emisije, poput činjenice da se apsorpcija nadolazećeg sunčevog zračenja (E_a) odvija po osvijetljenoj zemljinoj površini omeđenoj zemljinom kružnom siluetom, dok odlazni energetski tok sa Zemlje (emisijski tok) zrači ravnomjerno sa cijele Zemljine površine, pa slijedi da:

$$(1 - a)\pi R^2 S_0 = 4\pi R^2 e \sigma T_e^4 \quad (4)$$

Iz jednadžbe (2) dobivaju se daljnji matematički odnosi karakteristični za zemljin makro-energetski sustav, kao što je efektivni dolazni tok zračenja od Sunca. Konkretno, ovaj efektivni dolazni energetski tok povezan je sa efektivnim područjem omeđenim Zemljinom kružnom siluetom A_{sil} u odnosu na ukupnu površinu Zemljine sfere A_{sf} okarakteriziranog srednjim polumjerom Zemlje R :

$$\frac{A_{sil}}{A_{sph}} = \frac{\pi R^2}{4\pi R^2} = \frac{1}{4} \quad (5)$$

Pretpostavljajući idealnu kružnu zemljinu siluetu, slijedi da bi prosječni dolazni energetski tok sa Sunca koji iznosi $1367 \text{ W}/\text{m}^2$ na Zemljinoj lokaciji bio učinkovito ravnomjerno raspoređen po cijelom području Zemlje, tako da bi ekvivalentni dolazni tok bio raspoređen po cijeloj Zemljinoj površini, bila bi jedna četvrtina energetskog toka u interakciji s osvijetljenom/osunčanom površinom Zemlje (tj. efektivni energetski tok na cijeloj Zemljinoj površini iznosio bi $343 \text{ W}/\text{m}^2$).

Prethodno definirana apsorbirana energija sunčevog zračenja na Zemljinoj površini (E_a) u jednadžbi (1)

omogućuje daljnji uvid u varijaciju apsorbirane energije (E_a) bilo s konstantnim ili promjenjivim sunčevim zračenjem (S_0) i faktorima refleksije (Albedo) (a), što je zauzvrat izravno povezano s karakteristikama (sastav i koncentracija) Zemljine atmosfere i dijelom s refleksijskim karakteristikama Zemljine površine. S druge strane, jednadžba (2) koja definira emitiranu Zemljinu energiju zračenja (E_e) mogla bi se koristiti za analizu utjecaja na temperaturu Zemljine površine i njen odnos s faktorom emisije (e).

Na temelju jednadžbe (4) prosječna temperatura zemljine površine može se izračunati kao:

$$T_e = \left[\frac{(1 - a)S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} \quad (6)$$

Gornja jednadžba pokazuje da temperatura Zemljine površine izravno ovisi o toku sunčevog zračenja (S_0) na efektivnoj površini Zemlje omeđenom Zemljinom kružnom siluetom (A_{sil}), atmosferskim i Zemljinim albedo faktorom (a) i emisijskim faktorom zemljine površine (e). Također treba uzeti u obzir da zemljin ukupni emisijski faktor (e) pretežno ovisi o sastavu i koncentraciji Zemljine atmosfere, tj. prosječnoj vrijednosti njegovog efektivnog reflektirajućeg područja (vidi raspravu u sljedećim odjeljcima).

Dosadašnja istraživanja pokazala su da je faktor refleksije (Albedo) oko 30% (tj. $A = 0,300$), dok je faktor emisije (e) Zemlje oko 61,2% ($e = 0,612$) [73,74,75]. Ovi čimbenici mijenjaju energetsku ravnotežu zemljinog zračenja u odnosu na atmosfersku refleksivnost (Albedo faktor $a = 0$ ako nema atmosfere) i zemljino zračenje se razlikuje od idealnog modela crnog tijela (karakterizirano s $e = 1$).

Naročito se ti čimbenici mogu upotrijebiti za opisivanje svojstava atmosferskih plinova, okarakteriziranih njihovim kemijskim sastavom i efektivnom gustoćom, koja se zauzvrat može modelirati kao dolazno-odlazni reflektirajuće-apsorbirajuće-propusni „zaslon“ s obzirom na zemljinu površinu i okolni svemir. Isti princip se također može primijeniti na samu zemljinu površinu, tj. može se odlikovati i karakterističnim Albedo faktorom. S druge strane, stanje Zemlje kao nebeskog tijela koje posjeduje određenu količinu energije (E_e) i odlikuje se površinskom temperaturom (T) jedinstveno određuje ekvivalentni faktor emisije (e). Stoga se gornji odnosi koriste za uspostavljanje prosječnog modela ustaljenog makro-energetskog sustava Zemlje u kojem je Albedo faktor (a) povezan s gustoćom i sastavom Zemljine atmosfere, dok je faktor emisije (e) povezan s temperaturom Zemljine površine (T).

2.2. Zakon o idealnim plinovima i njegova veza sa svojstvima zračenja u atmosferi

Očito postoji fizički odnos između promatrane atmosferske reflektivnosti, apsorpcije i propusnosti energije zračenja i odgovarajućih varijabilnih karakteristika Zemljine atmosfere, što se prvenstveno odnosi na njezine sastojke, tj. sastav i koncentraciju vlažnih atmosferskih plinova (N_2 , O_2 , H_2O , Ar , CO_2 , Ne , He , CH_4 , Kr , H_2 , ...) i njihove izvedene karakteristike kao što su parcijalna i ukupna gustoća, molarni omjeri, molarna masa i slično.

Ovdje se pretpostavlja da su reflektirajuća svojstva (Albedo faktor) proporcionalna efektivnoj površini atmosferskih plinova, dok su apsorpcijska svojstva povezana s efektivnim volumenom i molarnim omjerom sastavnih dijelova atmosfere. To je osnova za sustavni pristup modeliranju utjecaja atmosfere na ukupnu apsorpciju, emisiju i refleksiju energije unutar Zemljinog makro-energetskog sustava na koji utječe nadolazeće sunčevo zračenje.

Odnos između sastava i gustoće vlažnih atmosferskih plinova (to su suhi atmosferski plinovi i vodena para) može se dobiti pomoću jednadžbe idealnog plina:

$$PV = nRT \quad (7)$$

gdje je:

P je atmosferski tlak iskazan u standardnim atmosferama na njegovoj maksimalnoj točki tj. pri zemljinoj površini

T je temperatura atmosferskih plinova iskazana u stupnjevima Kelvina na zemljinoj površini

V je volumen atmosferskih plinova iskazan u kubnim metrima (m^3)

R je opća plinska konstanta ($R = 0.000082 \text{ m}^3 \text{ atm} / (\text{kmol K})$)

n je molarna koncentracija plinova u jedinici volumena zemljine atmosfere pri čemu molarna koncentracija odgovara omjeru mase smjese plinova m i njezine prosječne molarne mase M (tj. $n = m / M$).

Budući da je gustoća (D) omjer mase (m) i volumena (V), tj. $D = m / V$ (kg / m^3), izvedeni zakon gustoće za idealne plinove također bi trebao biti valjan [1,66,67]:

$$D = \frac{MP}{RT} \quad (8)$$

Prema tome, gustoća atmosferskih plinova izravno je proporcionalna njihovoj efektivnoj molarnoj masi za

određeni atmosferski tlak i temperaturu. Ako molekularna koncentracija treba biti izvedena iz molarnih količina, u tu svrhu može se upotrijebiti Avogadrova konstanta $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ (molekula/mol).

Budući da se jednadžbe (6) i (7) odnose na istu fizičku količinu (atmosferska temperatura T u ovom slučaju), razumno je izjednačiti Zemljinu temperaturu odlaznog zračenja T_e s temperaturom atmosferskih plinova T_{pl} na površini Zemlje (gdje su njihove koncentracija i gustoća najviši):

$$T_e = T_p \quad (9)$$

Na temelju odnosa danih u jednadžbama (6) do (9), dobiva se sljedeći izravan odnos:

$$\left[\frac{(1-a)S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{P \cdot M}{D \cdot R} \right] \quad (10)$$

Stoga je moguće izraziti prosječnu gustoću (D) atmosferskih plinova u blizini Zemljine površine na temelju njihove prosječne temperature (T), to jest:

$$D = \left[\frac{P \cdot M}{T \cdot R} \right] \quad (11)$$

Nadalje, gore spomenuti zakon o idealnim plinovima može se koristiti i za izračun odgovarajućeg parcijalnog omjera površine i efektivne površine (%) atmosferskog „zaslona“ s obzirom na ukupnu površinu Zemljine atmosfere, kao i djelomičnih količina i efektivnog volumena (%) apsorpcijskog dijela ukupnog atmosferskog volumena Zemlje. Na taj se način fizikalno-matematički model zračenja može povezati s refleksno-apsorpcijskim procesima, što rezultira cjelovitijim opisom interakcije Zemljine atmosfere s dolaznim sunčevim zračenjem i njegovog odnosa sa stanjem atmosfere (temperaturom i tlakom), što u konačnici rezultira analitičkim predviđanjem temperature Zemlje u predloženom okviru.

3. Fizičko objašnjenje teorijske podloge kroz ilustrativne primjere

Na temelju prethodno objašnjenih odnosa, moguće je procijeniti trend promjene fizičkih veličina Zemljine atmosfere u odnosu na njene parametre i kvantificirati te varijacije u širokom rasponu promjena parametara.

3.1. Apsorbirana energija zračenja na površini Zemlje

Prema jednadžbi (4), apsorbirana energija zračenja (E_a) za slučaj bez zemljine atmosfere ($a = 0$) je kako slijedi:

$$E_a = (1 - 0) \cdot 3.14159 \cdot 6400000^2 \cdot 1367 = 1.759 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

dok bi apsorbirana energija zračenja (E_a) s trenutno postojećom atmosferom, koju karakterizira Albedo faktor $a = 0,300$, bila:

$$E_a = (1 - 0.300) \cdot 3.14159 \cdot 6400000^2 \cdot 1367 = 1.231 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

Stoga se apsorbirana energija (E_a) smanjuje s povećanjem Albedo (refleksijskog) faktora (a), dok u konkretnom slučaju trenutne Zemljine atmosfere ($a = 0,300$) smanjuje se za $0.53 \times 10^{17} \text{ W}$ u odnosu na slučaj kada refleksija nije prisutna ($a = 0$, idealna apsorpcija). To ukazuje da atmosfera Zemlje djeluje kao svojevrsna polupropusna membrana („zaslon“) dolazne energije sunčevog zračenja. Stoga se može zaključiti da porast atmosferske gustoće (tj. koncentracija atmosferskih plinova) treba rezultirati smanjenjem apsorbiranog sunčevog zračenja na Zemlji (E_a), i obrnuto. Treba napomenuti da na ukupni faktor refleksije (Albedo) djelomično utječu i prosječna reflektirajuća svojstva same Zemljine površine, što iznosi otprilike jednu trećinu procijenjene ukupne vrijednosti Albedo faktora [3,4,21,25,26,59,60,61,62].

3.2. Srednja površinska temperatura Zemlje

Izračun srednje zemljine površinske temperature (T) prema jednadžbi (6) za utvrđene vrijednosti parametara ($S_0 = 1367 \text{ W / m}^2$, $a = 0.300$ i $e = 0.612$) daje:

$$T = \left[\frac{(1-a)S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{(1-0,300) \cdot 1367}{4 \cdot 0,612 \cdot 0,0000000567} \right]^{1/4} = 288.1 \text{ °K ili } 15,0 \text{ °C}$$

Iz gornjeg izraza se može zaključiti da će srednja temperatura (T) opadati s povećanjem refleksivnosti (Albedo faktor a). Budući da je prethodno postavljeno da bi refleksivnost trebala biti proporcionalna gustoći atmosferskih plinova, srednja temperatura površine trebala bi se smanjivati s porastom gustoće Zemljine atmosfere i obrnuto. Nadalje, smanjenje faktora emisivnosti (e) dovodi do povećanja površinske temperature, dok porast dolaznog toka sunčevog zračenja također rezultira porastom površinske temperature.

Primjedba:

1. Ovako izračunata srednja temperatura zemljine površine predstavlja njen površinski temperaturni prosjek za cijelu globalnu površinu tijekom jednogodišnjeg razdoblja.
2. Neki objavljeni izračuni trenutne prosječne temperature zemljine površine, iako koriste ispravnu (potvrđenu) vrijednost Albedo faktora ($a = 0,300$), pogrešno koriste idealni teorijski faktor emisije crnog tijela ($e = 1$) umjesto realističniju vrijednost $e = 0,612$ [73,74,75]. Tako dobivena neusklađenost prosječne temperature Zemljine površine ($T_e = -18,1 \text{ °C}$ ili $254,86 \text{ °K}$ umjesto $T_e = 15,0 \text{ °C}$ ili $288,15 \text{ °K}$) proizlazi zbog neusklađenosti između emitirane energije dobivene za idealni faktor emisije crnog tijela $e = 1$ ($E_e = 7.536E+10^{16} \text{ W}$) u odnosu na točnu vrijednost ($E_e = 1.231E+10^{17} \text{ W}$) dobivenu korištenjem trenutno prihvaćene vrijednosti faktora emisije $e = 0.612$. Ova „neobjašnjiva“ 11,6% neusklađenost tako dobivene apsolutne termodinamičke temperature, zajedno s 38,8% nižim emisijskim fluksom energije, tradicionalno se pripisuje takozvanom „efektu staklenika“ plinske mješavine zemljine atmosfere [19].

Tablica 1. prikazuje usporedne izračune prosječnih površinskih temperatura s obzirom na pretpostavljene vrijednosti faktora refleksije (a), faktora emisije (e) i dolaznog fluksa sunčevog zračenja (S_0). Polazeći od hipotetičkog scenarija karakteriziranog: (i) potpunom odsutnošću Zemljine atmosfere (i bez atmosferskog refleksije, $a = 0$) i (ii) idealnim faktorom emisije crnog tijela ($e = 1$), ukupna apsorbirana energija zrači natrag u okolni prostor, a prosječna temperatura na površini je $5,48 \text{ °C}$. S pojavom u početku „tanke“ atmosfere, čija se gustoća progresivno povećava sve dok faktor refleksije atmosfere ne dosegne današnju utvrđenu vrijednost $a = 0,300$, održavajući idealni koeficijent emisije crnog tijela $e = 1$ i konstantni dolazni tok sunčevog zračenja ($S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$), prosječna temperatura površine se progresivno smanjuje na $-18,28 \text{ °C}$. Budući da Zemljina površina nema emisijska svojstva idealnog crnog tijela, njezin se faktor emisije (e) smanjuje na trenutno prihvaćenu vrijednost $e = 0,612$, a prosječna temperatura na površini odgovara na $15,0 \text{ °C}$. Konačno, ako bi se prosječni dolazni tok sunčevog zračenja povećao od trenutno prihvaćene vrijednosti $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ na vrijednost $S_1 = 1431 \text{ W/m}^2$, to bi rezultiralo daljnjim porastom temperature zemljine površine, čija bi

Tablica 1: Utjecaj parametara refleksivnosti "a", emisivnosti "e" i dolaznog srednjeg sunčevog radijacijskog fluksa "S₀" na srednju zemljinu površinsku temperaturu "T"

Tablica Utjecaj parametara refleksivnosti "a", emisivnosti "e" i dolaznog srednjeg sunčevog radijac. fluksa "S ₀ " (W/m ²), na srednju zemljinu površinsku temperaturu "T" (°C)				
Albedo "a"	Emisivnost "e"	Dol.rad.Sun. "S ₀ "	Sred.temper. "T"	Opis
0.000	1.000	1367	5.6	"T" pri rastu "a"
0.100	1.000	1367	-1.6	tj. rastu gustoće
0.200	1.000	1367	-9,5	atmosfere
0.300	1.000	1367	-18.1	
0.300	0.900	1367	-11.3	"T" pri padu "e"
0.300	0.800	1367	-3.5	tj. padu zemljine
0.300	0.700	1367	5.6	radijac.emisivnosti
0.300	0.612	1367	15.1	aktualno stanje
0.300	0.612	1387	16.2	"T" pri rastu "S ₀ "
0.300	0.612	1407	17.2	tj. rastu dolazne
0.300	0.612	1427	18.1	sunčeve radijacije

vrijednost dosegla 18,1 °C, tj. kada bi se povećao dolazni tok sunčevog zračenja za 4,4% (tj. od 1367 W/m² na 1427 W/m²).

3.3. Atmosferska svojstva koja povezuju ključne procese zračenja između Zemlje i Sunca

Karakteristični sastav i koncentracija atmosferskih plinova (suhi plinovi i vodena para) pretežno određuju omjere refleksije atmosfere, apsorpcije i emisije atmosfere, a posljedično, i smanjenje apsorbiranog dolaznog fluksa sunčevog zračenja. Da bi se utvrdila funkcionalna (matematičko-fizička) povezanost prethodno promatranih energetskih pojava, potrebno je započeti sa stvarnim (trenutnim) stanjem atmosfere, tj. njenom strukturom i pojedinačnim doprinosima njenih sastavnih dijelova, koji su dani u Tablici 2. [68,69].

Pod pretpostavkom homogene raspodjele atmosferskih plinova u donjoj atmosferi (tj. troposferi), i uz primjenu zakona o idealnim plinovima na plinsku smjesu koju sadrži atmosfera koja je karakterizirana doprinosom pojedinačnih plinova prikazanim u Tablici 3, mogu se izračunati parcijalne količine i ukupni volumeni atmosferskih plinova. Oni se mogu koristiti za utvrđivanje utjecaja volumena molekula plina po jedinici volumena atmosfere (omjer volumena u m³/m³ ili praktičnije u dm³/m³) i specifične površinske gustoće (površinski odnos u m²/m² ili praktičnije dm²/m²) molekula plina povezanih s efektivnim učinkom površinske zapreke sastavnih atmosferskih plinova, kao što je prikazano u Tablici 3.

Tablica 3. prikazuje ovisnost sastava i pojedinačnih udjela (% volumena) vlažnih atmosferskih plinova i

Tablica 2: Tipični sastav atmosfere

Tipični sastav donjeg dijela atmosfere (troposfere)

PLIN	SIMBOL	SASTAV
Dušik	N ₂	78,08%
Kisik	O ₂	20,95%
Vodena para	H ₂ O	2,00%
Argon	Ar	0,93%
Ugljični dioksid	CO ₂	0,04%
Neon	Ne	18,18ppm
Helij	He	5,24ppm
Metan	CH ₄	1,70ppm
Kripton	Kr	1,14ppm
Vodik	H ₂	0,53ppm
Dušikov oksid	N ₂ O	0,31ppm
Ugljični monoksid	CO	0,10ppm
Ksenon	Xe	0,09ppm
Ozon	O ₃	0,07ppm
Dušikov dioksid	NO ₂	0,02ppm
Jod	I ₂	0,01ppm
Amonijak	NH ₃	trag

Napomena: % = volumni udio, ppm = dio na milijun

odgovarajućih parcijalnih gustoća, te njihov ekvivalent površinske tj. refleksijske zapreke i volumnu tj. apsorpcijsku zapreku s obzirom na ulazno sunčevo zračenje.

Tablice prikazuju učinak površinske i volumne prepreke zemljinih atmosferskih plinova u odnosu na protok zračenja (i od Sunca i od same Zemlje) za trenutno prihvaćeni sastav atmosfere navedene u Tablici 3. Tako izračunati omjer volumena atmosferskih plinova

Tablica 3: ovisnost sastava i pojedinačnih udjela (% volumena) vlažnih atmosferskih plinova i odgovarajućih parcijalnih gustoća, te njihov ekvivalent površinske tj. refleksijske zapreke i volumne tj. apsorpcijske zapreke s obzirom na ulazno sunčevo zračenje.

Atmosferski plinovi	Ukupno	N ₂ (M=28)	O ₂ (M=32)	H ₂ O (M=18)	Ar (M=40)	CO ₂ (M=44)	Ostali (M=47)
% vol.atm.plin.	100,00	77,00	20,40	1,70	0,860	0,033	0,010
Gustoća D, kg/m ³	1,2177	0,9129	0,2764	0,0130	0,0146	0,0006	0,0002
Vol.% zapreke, dm ³ /m ³	28,553	21,560	6,324	0,306	0,344	0,014	0,005
Pov.% zapreke, dm ² /m ²	43,229	32,642	9,575	0,463	0,520	0,021	0,007

u atmosferi (0,0286 m³/m³ ili 28,6 dm³/m³) odnosi se na procese apsorpcije energije, dok se površinski omjer atmosferskih plinova u atmosferi (0,436 m²/m² ili 43,6 dm²/m²) odnosi na reflektiranje zračenja, tj. Albedo efekt [19,21,62]. To ukazuje da se atmosfera može smatrati polupropusnom „zaprekom“ koja je jednako propusna (ili nepropusna) kako za dolazno tako i za odlazno zračenje, kao i da njena svojstva određuju raspodjelu energije zračenja u atmosferi (tj. radijacijsku refleksiju, apsorpciju i propusnost).

Tablica 4. kvantificira prosječne površinske atmosferske temperature (T) prema jednadžbama (1), (2) i

(10) za različite vrijednosti parametara atmosferskih plinova, kao što su atmosferski tlak (P), molarna masa (M) i gustoća (D) i drugi vitalni parametri zemljinog energetskog sustava: reflektivnost (a), faktor emisije (e) i protok sunčevog zračenja (S₀). Rezultati analize energetske bilance pokazuju da je prosječna temperatura najosjetljivija na varijacije ulaznog sunčevog fluksa S₀ i promjene faktora emisije (e) (za (DT/T)/(DS₀/S₀) = 4.75 i (DT/T)/(De/e) = 4.89), dok je učinak varijacija Albedo faktora (a) za usporedbu oko 2,4 puta slabiji. S druge strane, kada se atmosferski plinovi analiziraju kao idealni plinovi, najviše se ističe utjecaj tlaka na

Tablica 4: Analiza osjetljivosti srednje zemljine površinske temperature na promjene parametara energetskog sustava Zemlje

IZRAČUNI OSJETLJIVOSTI TEMPERATURE NA PARAMETRE ZEMLJINOG ENERGETSKOG SUSTAVA

$$\left[\frac{(1 - a) S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{P \cdot M}{D \cdot R} \right]$$

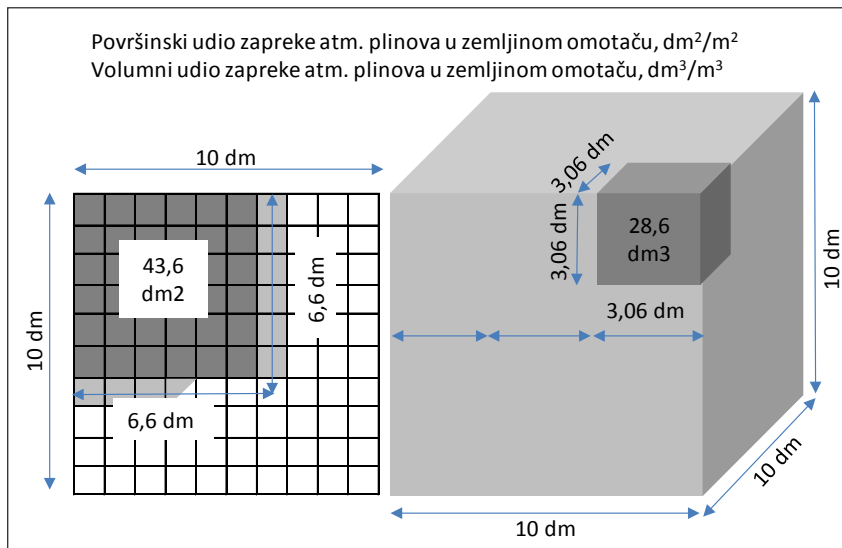
T zem.površine, T = f (a, e)

Parametar	Vrijednost	T (°C)
a (0.300)	300	
e (0.612)	612	15,00
S ₀ (1367)	1367	
a	0.280	T = 17.04
a	0.290	T = 16.02
a	0.300	T = 15.00
a	0.310	T = 13.96
a	0.320	T = 12.92
e	0.592	T = 17.40
e	0.602	T = 16.19
e	0.612	T = 15.00
e	0.622	T = 13.83
e	0.632	T = 12.69
S ₀	1347	T = 13.94
S ₀	1357	T = 14.47
S₀	1367	T = 15.00
S ₀	1377	T = 15.53
S ₀	1387	T = 16.05

T atm.plinova, T = f (PV/nR)

Parametar	Vrijednost	T (°C)
P (1008)	1008	
M (28.553)	28553	15,02
D (1.218)	1218	
P	1004	T = 13.88
P	1006	T = 14.45
P	1008	T = 15.02
P	1010	T = 15.59
P	1012	T = 16.17
M	28.533	T = 14.82
M	28.543	T = 14.92
M	28.553	T = 15.02
M	28.563	T = 15.12
M	28.573	T = 15.12
D	1.216	T = 15.50
D	1.217	T = 15.26
D	1.218	T = 15.02
D	1.219	T = 14.79
D	1.220	T = 14.55

Napomena: T = temperatura zemljine površine, a = reflektivnost (Albedo), e = emisivnost, S₀ = sunčeva radijacija, P = atm.tlak, M = molekularna težina atm. plinova, D = gustoća atmosferskih plinova.
 Pri promjeni odgovarajućeg parametra, ostali parametri su standardne vrijednosti (bold)



Slika 1. Efektivna površina i efektivni volumen atmosferskih plinova s obzirom na jediničnu površinu i jedinični volumen zemljinog atmosferskog omotača daje omjer površina i volumena $0,436 : 0,0286 \text{ (m}^{-1}\text{)}$, to jest $15,245 : 1 \text{ (m}^{-1}\text{)}$

temperaturu $(DT/T)/(DP/P)$, dok promjene molarne mase (M) i gustoće (D) imaju manje naglašen utjecaj na temperaturu.

4. Ravnotežno stanje ključnih parametara prema trenutnoj teoriji

Osnova za razumijevanje predloženog modela te slijedne parametrizacije i izračunavanja proizlazi iz raspodjele dolaznog toka sunčevog zračenja tijekom njegove interakcije s Zemljinom atmosferom (tj. djelomičnim refleksijom, apsorpcijom i preostalom propusnošću do zemljine površine). Istovremeno, energija koja je prenesena na Zemljinu površinu sada djeluje na Zemljinu atmosferu na isti način, ali u suprotnom smjeru. Ovaj proces rezultira djelomičnim refleksijom odlaznog zračenja, zajedno s apsorpcijom unutar atmosfere i propusnošću preostale energije u okolni prostor, dok se u isto vrijeme odvija i mnogo sporiji proces desorpcije energije sa zemljine površine i atmosfere također u okolno zemljino okruženje.

Atmosfera ima ključnu ulogu u načinu raspodjele sunčevog zračenja, prvenstveno tijekom početne interakcije s atmosferom, kada se oko 30% dolaznog toka sunčevog zračenja reflektira od atmosferskih plinova natrag u okolni svemirski prostor, ostatak se dijelom apsorbira u atmosferi a dijelom doseže zemljinu površinu [8,17,62,63,64,65]. Tijekom samog prolaska ne-reflektiranog zračenja kroz atmosferu oko 19% se apsorbira prvenstveno u ukupnoj masi atmosferskih plinova i u oblacima, dok je preostalih 51%, koji doseže Zemljinu površinu, trenutno podložno Zemljinoj odlaznoj sekundarnoj emisiji zračenja na temelju trenutnog energetskog stanja Zemljine površine [8,11,17,43,64,65].

Stoga se preostala polovina prvobitno dostupne energije dolaznog zračenja emitira natrag, i u povratku se ponovo suočava s atmosferom ali sada u suprotnom (odlaznom) smjeru, s istim relativnim omjerima atmosferske refleksije, apsorpcije i propusnosti kao u slučaju izvornog dolaznog zračenja. To je zbog činjenice jer se atmosferski uvjeti ne mogu trenutačno promijeniti, tako da bi, kako za dolazne tako i za odlazne radijacijske procese (koji se odvijaju brzinom koja odgovara brzini svjetlosti), trebala biti valjana ista atmosferska svojstva (sastav i relativne koncentracije plinova). Naravno, to rezultira istim efektima atmosferske površinske refleksivnosti i učinkovitosti atmosferske volumske apsorpcije energije kako za dolazne tako i za odlazne radijacijske procese.

Dosadašnja mjerenja pokazuju (uz stanovite razlike) su da su omjeri refleksije atmosferskih plinova, oblaka i Zemljine površine otprilike 3:17:10, odnosno da je taj međusobni omjer karakterističan za trenutno uspostavljenu konfiguraciju atmosfere i Zemljine površine [8,17,65]. Kao što je ranije rečeno, atmosfera zadržava ista svojstva refleksije i za dolazno i za odlazno zračenje. Istovremeno, omjer radijacijske apsorpcije za atmosferske plinove i oblake iznosi otprilike 16:3, i to podjednako kako za dolaznu sunčevu radijaciju tako i za odlaznu zemljinu radijaciju [8,11,17,65]. Kao što je gore navedeno (vidi Sliku 1. i Tablicu 3.), ekvivalentni efekt površinske refleksije (efektivni omjer površine $0,436 \text{ m}^2/\text{m}^2$) i volumne apsorpcije energije (efektivni omjer volumena $0,0286 \text{ m}^3/\text{m}^3$) trebali bi igrati ključnu ulogu pri refleksijskim i apsorpcijskim procesima unutar atmosfere, čime se učinkovito utvrđuju promatrani omjeri apsorpcije dolaznog i odlaznog zračenja od 2:1 te omjer refleksije dolaznog i odlaznog zračenja od 3:1.

Tablica 5: Ilustracija međudnosa između parametara Zemljinog energetskog sustava

ODNOSI MEĐU PARAMETRIMA ZEMLJINOG ENERGETSKOG SUSTAVA (albedo, emisivnost, temperatura, gustoća atmosfere, apsorbirana zemljina energija, emitirana zemljina energija)

a	e	T °C	T °K	D kg/m ³	E _a W	E _{e/d} W
0,270	0,588	21,0	294,12	1,193	1,283E+17	1,283E+17
0,275	0,592	20,0	293,11	1,197	1,275E+17	1,275E+17
0,280	0,596	19,0	292,11	1,202	1,266E+17	1,266E+17
0,285	0,600	18,0	291,12	1,206	1,257E+17	1,257E+17
0,290	0,604	17,0	290,13	1,210	1,248E+17	1,248E+17
0,295	0,608	16,0	289,14	1,214	1,240E+17	1,240E+17
0,300	0,612	15,0	288,15	1,218	1,231E+17	1,231E+17
0,305	0,616	14,0	287,17	1,222	1,222E+17	1,222E+17
0,310	0,620	13,0	286,18	1,226	1,213E+17	1,213E+17
0,315	0,624	12,1	285,21	1,231	1,204E+17	1,204E+17
0,320	0,628	11,1	284,23	1,235	1,196E+17	1,196E+17
0,325	0,632	10,1	283,26	1,239	1,187E+17	1,187E+17
0,330	0,636	9,1	282,28	1,243	1,178E+17	1,178E+17

Napomena: Izvedene jednadžbe za potrebe tabličnog izračuna

$$T = \left[\frac{(1-a)S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} \quad \left[\frac{(1-a)S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{P \cdot M}{D \cdot R} \right] \quad \left[\frac{E_a}{(4\pi R^2)\sigma e} \right]^{1/4} = \left[\frac{P \cdot M}{D \cdot R} \right]$$

$$E_a = (1-a)\pi R^2 S_0 \quad E_e = (4\pi R^2)\sigma T_e e$$

Napomena: Mjera ukupnog apsorbiranog energetskog toka E_a i ukupnog emitiranog i desorbiranog energetskog toka E_{e/d} izražava se kao stopa energije (snaga) u vatima (W).

Kao što je prethodno navedeno, promatrana prosječna vrijednost faktora refleksije (Albedo) a = 0,300 i prosječna vrijednost faktora emisije e = 0,612 implicitno određuju radijacijske procese u stabilnom stanju. Dok faktor ukupne refleksije (Albedo) obuhvaća refleksijske doprinose atmosferskih plinova, oblaka i Zemljine površine (3% + 17% + 10% = 30% ili a = 0.300), ukupni faktor zemljine emisije ili zemljine radijacije predstavlja dijelom zemljinu površinsku refleksiju (što je dio Albedo efekta) a dijelom zemljinu emisijsku radijaciju zbog razine energije prema zakonu Stefana-Boltzmann, tako da bi ukupni faktor emisije trebao odražavati ovu energetsku bilancu (tj. 10% zemljinog refleksivnog zračenja zajedno s 51,2% zemljinih površinskih emisija što se odnosi na ukupni promatrani faktor emisija od 61,2% tj. e = 0,612).

Kao što je gore prikazano, prosječna temperatura Zemljine površine koja se dobiva s tim parametrima u uvjetima stabilnog stanja energije iznosi 15,0 °C ili 288,15 °K zadovoljava zemljinu energetsku ravnotežu.

Stoga bi trebao postojati točan fizički odnos između Zemljine površine, Zemljine atmosfere i Sunca, pri čemu bi parametri dotičnog energetskog sustava trebali pokazati strogu međusobnu vezu. Tablica 5 prikazuje međusobne odnose apsorbirane radijacijske energije na zemljinoj površini E_a (W) i ukupno emitiranu (reflektiranu, apsorbiranu i desorbiranu) energiju E_e (W) sa zemljine površine i atmosfere u okolni vanjski prostor, i to s obzirom na ključne parametre predstavljenog modela energetskog sustava Zemlje, tj. ukupni reflektirajući (Albedo) faktor (a), ukupni emisijski faktor (e), površinsku temperaturu (T) i gustoću atmosferskih plinova (D).

Gornji numerički primjer nije samo koristan za predviđanje trenutno promatrane temperature Zemljine površine, već i za stjecanje daljnjeg uvida u međusobne odnose ključnih parametara Zemljinog energetskog sustava na temelju fundamentalnih fizičkih zakona i iz njih izvedenih analitičkih odnosa od (6) do (10) za predviđanje temperature zemljine površine i temperature atmosferskih plinova u blizini

te površine, koja bi trebala biti u stanju ravnoteže pod pretpostavkama stacionarnog stanja:

$$T_{e/pl} = \left[\frac{(1-a)S_0}{4e\sigma} \right]^{1/4} = \left[\frac{P \cdot M}{D \cdot R} \right] \quad (12)$$

Drugim riječima, na temelju gornjeg izravnog odnosa, mogu se prepoznati sljedeći utjecajni faktori odstupanja temperature zemljine površine, poredani prema njihovoj dinamici:

1. Promjene sunčevog dolaznog radijacijskog fluksa imaju najneposredniji učinak, pri čemu njegov porast rezultira povećanjem temperature i obrnuto;
2. Promjene u atmosferi i/ili zemljinoj površinskoj fizionomiji zbog varijacija koncentracije, gustoće, molarne mase i pritiska atmosferskih plinova i/ili zemljine reflektirajuće površine (npr. smanjenje visoko reflektirajućih snježno/ledenih površina u slabo reflektirajuće površine poput šuma i livada) je relativno sporiji proces, pri čemu padajući Albedo efekt rezultira višim površinskim temperaturama i obrnuto.
3. Varijacija Zemljinog prosječnog faktora emisije, koja je izravno povezana s promjenom energetskog kapaciteta Zemlje kao nebeskog tijela, vjerojatno će se primijetiti jedino tijekom vrlo dugog vremenskog perioda. Ipak, ako se faktor emisije poveća, to bi rezultiralo nižim površinskim temperaturama i obrnuto.

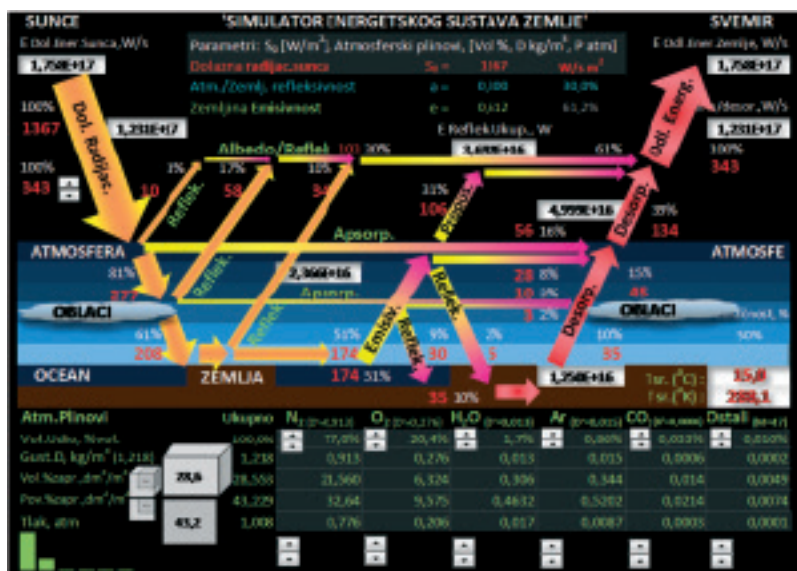
Treba imati na umu da bi međusobni geometrijski odnosi Zemlje i Sunca i stanje cikličke dinamike zemljine osi i orbite u odnosu na Sunce (koje ovdje nije obrađeno, ali su je obrađivali drugi autori, kao na

pr. Milanković [71,72]) mogli podignuti razinu preciznosti predloženog modela i stvoriti osnovu preciznijeg makro-klimatskog modela.

4.1. Razvijen simulacijski alat koji uključuje predloženi makroenergetski model Zemlje

Na temelju prethodno predstavljenog fizikalno-matematičkog modela stacionarnog stanja i njegovih relevantnih parametara kao i jedinstveno određenih omjera protoka energije zračenja unutar makroenergetskog sustava Zemlje, razvijen je i testiran softverski računalni simulacijski model. Ovaj stacionarni model, parametriziran s trenutno prihvaćenim vrijednostima parametara Zemljinog makroenergetskog sustava (Albedo faktor a , faktor emisije e i ulazni tok sunčevog zračenja S_0 uz izmjereni ili poznati sastav i koncentraciju atmosferskih plinova), može predvidjeti temperaturu Zemljine površine s prihvatljivom razinom preciznosti, kao što je prikazano u prethodnom poglavlju. Karakteristični izgled sučelja softverskog simulacijskog modela, prikazan na Slici 2, uključuje detaljan prikaz raspodjele energije zračenja unutar makroenergetskog sustava Zemlje u skladu s predstavljenom teorijskom pozadinom.

Štoviše, sučelje softverskog modela također prikazuje ukupnu ravnotežu ulazno-izlazne energije i sustavno popisuje sve utjecajne parametre predloženog simulacijskog modela, zajedno s njihovim odnosima s parametrima koji opisuju karakteristike atmosferskih plinova (omjer volumena pojedinačnih atmosferskih plinova, ukupna gustoća plinova, efektivni omjeri površine i volumena i atmosferski tlak plinova), čime se napokon daje predviđanje prosječne površinske temperature.



Slika 2. Računalno softversko sučelje s detaljnim prikazom stvarne raspodjele energije zračenja u prosječnim uvjetima makroenergetskog sustava Zemlje.

5. Zaključak

U radu je predstavljen prosječni model Zemljinog makro-energetskog sustava koji se sastoji od Sunca kao primarnog izvora energije zračenja, zemljine atmosfere kao dvosmjernog polupropusnog zaslona zračenju i zemljine površine. U okviru predloženog modela uspostavlja se stacionarna ravnoteža dolazne energije i energije emitirane natrag u svemir, uzimajući u obzir kemijska svojstva zemljine atmosfere i poštujući Stefan-Boltzmannov zakon zračenja. Model je validiran na temelju ažurnih podataka o ključnim parametrima zemljinog modela kao sivog tijela, tj. Albedo i koeficijenta emisije, a također na temelju poznatog kemijskog sastava zemljine atmosfere bio je u mogućnosti predvidjeti opće prihvaćene prosječne vrijednosti temperature zemljine površine.

U predloženom modelu atmosferski plinovi koji ključno utječu na emisiju, apsorpciju i propuštanje dolaznog i odlaznog toka energije zračenja Zemljine atmosfere, se koriste za izračune efektivne površine i efektivnog volumena unutar ukupne površine i volumena atmosferskog „omotača“. Ta se svojstva izračunavaju na temelju gustoće i tlaka atmosferskih plinova prema zakonu idealnih plinova koji koriste prosječnu molarnu masu takvog idealnog plina prema doprinosu svake sastavne komponente po jedinici volumena. Stoga one atmosferske komponente koje su zastupljenije (tj. koje imaju veći omjer površine i volumena u odnosu na ukupnu atmosfersku površinu i volumen) također imaju

dublji učinak na ponašanje atmosferskog „omotača“ kao polupropusnog „zaslona“ dolaznoj i odlaznoj energiji zračenja, kao i svojstvima apsorpcije i de-sorpcije atmosferske energije koje učinkovito određuju prosječnu temperaturu na Zemljinoj površini. Suprotno tome, one atmosferske komponente s malom zastupljenošću u atmosferskom modelu „omotaču“ trebale bi imati neznatni učinak na predviđanje prosječne temperature Zemlje u predloženom modelu. To se očito ne slaže s trenutno prihvaćenom ulogom CO₂ i drugih „stakleničkih“ plinova koji su relativno oskudni u miješanju atmosferskih plinova, pa je potrebno daljnje istraživanje i rasprava unutar znanstvene zajednice.

Predstavljeni model je također korišten za demonstriranje osjetljivosti prosječne temperature Zemljine površine s obzirom na ključne parametre makro-energetskog modela. Posebno je prosječna temperatura najosjetljivija na dolazne promjene sunčevog toka S_0 i promjene faktora emisije (e), dok je učinak Albedo faktora (a) oko 2,5 puta slabiji u usporedbi. S druge strane, kada se atmosferski plinovi analiziraju kao idealni plinovi, najviše se ističe utjecaj tlaka i temperature, dok je učinak promjene molarne mase i gustoće na temperaturne razlike znatno manje naglašen.

Budući rad može se usmjeriti na daljnje usavršavanje modela na temelju ažuriranih procjena Zemljine prosječne temperature, dolaznog sunčevog zračenja, odlaznog Zemljinog zračenja, Albedo faktora i faktora emisije, jer uobičajena i sve preciznija mjerenja postaju sve dostupnija.

Literatura

1. A. Galović, Termodinamika II, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
2. M. Zglavnik, Tko (ili što) je krivac za klimatske promjene?, EGE, 5/2018.
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth
4. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
5. Alley, R.B. 2000. The Two-Mile Time Machine: Ice Cores, Abrupt Climate Change, and Our Future. Princeton University Press.
6. B. Halasz, I. Boras, A. Galović: Toplinske tablice, FSB, Zagreb, 2011.
7. Wang, W.-C., Y.L. Yung, A.A. Lacis, T. Mo, and J.E. Hansen 1976. Greenhouse effects due to man-made perturbation of trace gases. Science 194, 685-690.
8. Cahalan, R. (n.d.) Solar and Earth Radiation. Accessed December 12, 2008.
9. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Earth_Temperature_without_GHGs
10. https://www.researchgate.net/publication/260208782_An_update_on_Earth's_energy_balance_in_light_of_the_latest_global_observations
11. Kushnir, Solar Radiation and the Earth's Energy Balance. Published on The Climate System, complete online course material from the Department of Earth and Environmental Sciences at Columbia University. Accessed December 12, 2008.
12. <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2007/04/the-lag-between-temp-and-co2/>
13. Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G.A., and Tausnev, N. (2005). Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. Science, (308) 1431-1435.
14. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page2.php>
15. <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/energy-driver-climate-review.php>
16. https://www.iceagenow.com/Global_Warming_Myth.htm

17. Kushnir, Y. (2000). Solar Radiation and the Earth's Energy Balance. Published on The Climate System, complete online course material from the Department of Earth and Environmental Sciences at Columbia University. Accessed December 12, 2008.
18. Trenberth, K., Fasullo, J., Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society.
19. <https://earthscience.stackexchange.com/questions/7696/how-to-calculate-the-temperature-of-earths-surface/7697#7697>
20. Marshall, J., and Plumb, R.A. (2008). Chapter 8: The general circulation of the atmosphere. In *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: an Introductory Text* (pp. 139-161).
21. <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/A/Albedo>
22. J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo, Global Surface Temperature Change, NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, NY 10025, USA, 14 December 2010.
23. P. D. Jones and M. New, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich NR47TJ, England, UK.
24. <https://www.calacademy.org/educators/earths-delicate-energy-balance>
25. <https://scied.ucar.edu/earths-energy-balance>
26. https://list.fandom.com/wiki/List_of_scientists_who_disagree_with_the_scientific_consensus_on_global_warming
27. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_scientists_who_disagree_with_the_scientific_consensus_on_global_warming
28. https://www.sciencedaily.com/terms/global_warming_controversy.htm
29. <http://blogs.discovermagazine.com/imageo/2018/03/12/what-science-says-about-role-of-co2-in-climate-change/#.XQU1603Nv3g>
30. https://en.wikipedia.org/wiki/Stefan%E2%80%93Boltzmann_law
31. <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>
32. M.J.Stefan, Über die Beziehung zwischen der Warmerstrahlung und der Temperatur, Akademie der Wissenschaften, Wien, Jahrgang 1879.
33. http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/stefan_boltzmann.html
34. Kenneth Krane. *Modern Physics*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
35. R. Wolfson, (May 8, 2015). *Energy, Environment and Climate*, 2nd ed. New York, U.S.A.: Norton, 2012.
36. John Cook, Hayden Washington. (May 1, 2015). *Climate Change Denial*, 1st Edition. Earthscan.
37. Jerry Coffey, *Temperature of Earth*, May 7, 2015
38. J. Zillman, S. Sherwood, *Climate Change*, Research Centre The University of New South Wales, 2015
39. P. Brohan, J. Kennedy, I. Harris, S. Tett, P. Jones, 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes, *Geophysical Research*, January 21, 2006.
40. W. Collins, ..., *The Physical Science Behind Climate Change*, *Scientific American* 297, 64, August 2007.
41. E. Friis-Christensen, and K. Lassen, „Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate“, *Science*, 254, 698-700, 1991.
42. J. Kiehl, and K. Trenberth, Earth's Annual Global Mean Energy Budget, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 197, 1997.
43. J. Petit, ..., „Climate and Atmospheric History of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica“, *Nature*, 3 June 1999.
44. H. Svensmark, „Influence of Cosmic Rays on Earth's Climate“, *Physical Review Letters*, 81, 22, 5027-5030, 1998.
45. N. Loeb, et al., Heating of Earth's climate system continues despite lack of surface warming in past decade. *Nature Geosci.* 5, 110–113, 2012
46. Bekker, A. et al. Dating the rise of atmospheric oxygen. *Nature* 427, 117–120 (2004)
47. Berner, R. A. GEOCARBSULF: A combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, 5653–5664 (2006)
48. Catling, D. C., Zahnle, K. J. & McKay, C. P. Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early Earth. *Science* 293, 839–843 (2001)
49. Farquhar, J., Bao, H. & Thiemans, M. Atmospheric influences of Earth's earliest sulfur cycle. *Science* 289, 756–758 (2000)
50. Hessler, A. M. et al. A lower limit for atmospheric carbon dioxide levels 3.2 billion years ago. *Nature* 428, 736–738 (2004)
51. Kashefi, K. & Lovley, D. R. Extending the upper temperature limit for life. *Science* 301, 934 (2003)
52. <https://medium.com/@pullnews/what-i-learned-about-climate-change-the-science-is-not-settled-1e3ae4712ace>
53. Hulme M, Why we disagree about climate change, Cambridge University, 2009
54. Borick, C. P., and B. G. Rabe, 2010: A reason to believe: Examining the factors that determine individual views on global warming. *Soc. Sci. Quart.*, 91, 777–800.
55. Li, Y., E. J. Johnson, and L. Zaval, 2011: Local warming: Daily temperature change influences belief in global warming. *Psychol. Sci.*, 22, 454–459.
56. Wolf, M. J. P., 1999: Subjunctive documentary: Computer imaging and simulation. *Collecting Visible Evidence*, J. Gaines and M. Renov, Eds., University of Minnesota Press, 274–291.
57. Graeme L. Stephens and others, An update on Earth's energy balance in light of the
58. latest global observations, Macmillan Publishers Limited 2012, 691-695.
59. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Greenhouse_effect
60. https://www.windows2universe.org/teacher_resources/AGUNESTA_GIFT/2012/Huffman/Andrill_EarthsAlbedo.pdf
61. <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200469%281949%29006%3C0277%3ATAOTPE%3E2.0.CO%3B2>
62. <https://wattsupwiththat.com/2019/05/23/an-analysis-of-the-earths-energy-budget/>
63. <https://ag.tennessee.edu/solar/Pages/What%20Is%20Solar%20Energy/Earth-Energy-Budget.aspx>
64. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance>
65. <https://eesc.columbia.edu/courses/eesc/climate/lectures/radiation/index.html>
66. https://en.wikipedia.org/wiki/Ideal_gas_law

67. https://hr.wikipedia.org/wiki/Plinski_zakoni
68. https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth
69. http://www.iup.uni-bremen.de/does/lectures/richter_atmospheric_chemistry_02.pdf
70. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Milankovitch_cycle
71. Milankovitch Cycles. [Online]. Available: <https://i2.wp.com/timescavengers.blog/wp-content/uploads/2017/01/milankovitch-cycles.jpg?ssl=1>
72. NASA Observatory, „Miultin Milankovitch (1879-1958) Orbital Variations“ [Online]. Available: https://Earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/milankovitch_2.php
73. <https://www.climate-debate.com/forum/if-the-emissivity-of-a-body-decreases-then-its-temperature-should-decrease--d6-e1073.php>
74. https://gravity.wikia.org/wiki/Climate_model
75. https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_model

O autorima

Ivica Billege, član Znanstvenog vijeća za naftno-plinsko gospodarstvo i energetiku Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti od 1982. i dugogodišnji profesionalni djelatnik u INA-Industriji nafte, d.d. Zagreb. Bavio se operativnim vođenjem rafinerijskih procesa i poslovanja rafinerija te znanstvenim radom u širem području energetike i užem području IT, odnosno kreiranja/korištenja računalnih tehnologija.

Danijel Pavković radi kao izvanredni profesor na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Njegovi istraživački interesi uključuju energetske sustave i mikromreže te mehatroničke sustave za duboko bušenje. Aktivni je član društva IEEE više od 15 godina. Također je član Znanstvenog vijeća za naftno-plinsko gospodarstvo i energetiku Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti od 2018. te član su-osnivač Znanstvenog centra za znanost o podacima i kooperativne sustave (ZCI ACROSS-DataScience) od njegovog uspostavljanja 2015. godine.